

Fud-program 2013

Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall

September 2013

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co

Box 250, SE-101 24 Stockholm
Phone +46 8 459 84 00



ISSN 1104-8395

ID 1407065

Fud-program 2013

Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall

September 2013

Förord

Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, som ägs av de företag som driver de svenska kärnkraftverken har till uppgift att ta hand om det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet från reaktorerna. Enligt kärntekniklagen ska tillståndshavarna till de svenska reaktorerna i samråd utarbeta ett program för den forsknings- och utvecklingsverksamhet och de övriga åtgärder som behövs för att på ett säkert sätt hantera och slutförvara kärnavfallet och det använda kärnbränslet samt för att avveckla kärnkraftverken. Tillståndshavarna har genom avtal delegerat till SKB att för deras räkning lämna in programmet till Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM). SKB presenterar nu Fud-program 2013 som tagits fram i samverkan med kärnkraftsföretagen för att uppfylla dessa krav.

Efter drygt tre decennier av forskning, teknikutveckling och undersökningar, ansökte SKB våren 2011 hos myndigheterna om att få uppföra och driva ett slutförvar för använt kärnbränsle enligt KBS-3-metoden i Forsmark och en anläggning för inkapsling av använt kärnbränsle i anslutning till mellanlagret för använt kärnbränsle i Oskarshamn. Tillståndsprocessen pågår och beräknas ta ytterligare några år. SKB bedriver parallellt med detta den forskning och teknikutveckling som behövs för att kunna projektera, uppföra och driva KBS-3-systemet på ett rationellt sätt samtidigt som kraven på långsiktig säkerhet, låg stråldos och säkerhet vid drift av anläggningarna samt god yttre miljö uppfylls. Det innebär att de principlösningar som presenterats i ansökningarna ska överföras till ett industrialiserat produktionssystem med uppfyllande av ställda kvalitetskrav. Forskningen fokuseras på processer av betydelse för den långsiktiga säkerheten, särskilt de faktorer som säkerhetsanalysen SR-Site visat bidrar till risken för skadeverkningar och där förutsättningarna för analysen kan förbättras genom ytterligare forskningsinsatser.

Inom kort kommer SKB också att lämna in ansökningar om att bygga ut Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall i Forsmark, SFR, för att få kapacitet att slutförvara tillkommande avfall från drift och avveckling av de kärntekniska anläggningarna. Ansökningarna har bland annat föregåtts av samråd med berörda, lokaliseringsutredning, platsundersökning, platsmodellering och projektering. Ett viktigt underlag är den förberedande preliminära säkerhetsredovisning som nu tas fram och som kommer att ingå i ansökan enligt kärntekniklagen. Inriktningen på den fortsatta forskningen om avfallet och barriärerna i SFR kommer till stor del att styras av resultaten i den säkerhetsanalysen.

Slutförvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall, SFL, är det förvar som planeras att ta i drift sist. Arbete för att kunna omhänderta det långlivade avfallet pågår och programmet presenterar de handlingsalternativ som föreligger, liksom den utveckling och forskning som krävs för att detta arbete ska kunna fortskrida.

Stockholm i september 2013
Svensk Kärnbränslehantering AB



Christopher Eckerberg
Vd



Olle Olsson
Direktör

Sammanfattning

Det svenska systemet för att ta hand om radioaktivt avfall delas in i två huvuddelar, en för det låg- och medelaktiva avfallet och en för det använda kärnbränslet. Mellanlagret för använt kärnbränsle, Clab, och Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall, SFR, har, liksom transportsystemet varit i drift sedan 1980-talet. Andra anläggningar eller anläggningsdelar återstår att bygga.

I Fud-program 2013 redogör SKB för sina planer för forskning, utveckling och demonstration under perioden 2014–2019. Programmet består av fem delar:

- Del I SKB:s verksamhet och handlingsplan
- Del II Låg- och medelaktivt avfall
- Del III Använt kärnbränsle
- Del IV Forskning för analys av långsiktig säkerhet
- Del V Samhällsvetenskaplig forskning

SKB presenterar i detta Fud-program den forskning och teknikutveckling som behövs för att kunna projektera, uppföra och driva de planerade anläggningarna och anläggningsdelarna samt för att bibehålla en säker drift av de befintliga anläggningarna. Detta arbete bedrivs till stor del i egen regi, men sker också i samarbete med universitet och högskolor runt om i världen. SKB deltar även i ett flertal internationella organisationers arbete med att lösa frågan om hur använt kärnbränsle och radioaktivt avfall tas om hand. SKB samarbetar också med systerorganisationer i andra länder och under 2013 inleddes planeringen för att fördjupa samarbetet med Posiva i Finland. Målet med det samarbetet är att utveckla gemensamma lösningar för slutförvarssystemet för använt kärnbränsle.

Utöver Fud-program lämnar SKB in andra redovisningar om planer och verksamheter till SSM, till exempel ansökningarna för Kärnbränsleförvaret och inkapslingsanläggningen 2011, kommande ansökningar för utbyggnaden av SFR, studier och planer för avveckling av kärnkraftsreaktorer och andra kärntekniska anläggningar, återkommande helhetsbedömningar för anläggningar i drift och kostnadsuppskattningar i form av Plan-rapporter. För att undvika dubbel redovisning upprepas inte innehållet i dessa i detta program, utan vid behov görs hänvisningar till redovisningarna.

I Fud-program 2010 låg fokus på redovisning av planerna för att bygga och driftsätta återstående anläggningar för låg- och medelaktivt avfall, vilket innefattar en utbyggnad av SFR och ett slutförvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall. Även planeringen och metodutvecklingen inför avvecklingen av de kärntekniska anläggningarna beskrevs. Teknikutvecklingen inför slutförvaringen av det använda kärnbränslet redovisades, liksom SKB:s forskning som stödjer analyserna av den långsiktiga säkerheten för Kärnbränsleförvaret och utbyggnaden av SFR.

I sin granskning av Fud-program 2010 framförde SSM att SKB bör redovisa planer och strategier avseende avveckling av kärnkraftverken, inklusive Ågesta, mera utförligt. Vidare bedömde SSM att SKB bör fördjupa redovisningen av programmet för långlivat låg- och medelaktivt avfall med hänsyn till olika handlingsalternativ för hantering och slutförvaring av detta avfall. Behovet av denna redovisning framgick också av regeringens beslut om programmet. I detta beslut fanns också ett villkor om att reaktorinnehavarna inför Fud-program 2013 skulle samråda med SSM i frågor rörande slutförvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall samt planer och studier för avveckling av kärntekniska anläggningar. Samråd har genomförts under 2012 och 2013.

Del I SKB:s verksamhet och handlingsplan

I del I redovisas de övergripande planerna för att driva SKB:s befintliga anläggningar och realisera de återstående delarna av avfallssystemet.

Verksamhet och anläggningar

Den svenska kraftindustrin har under drygt 40 år producerat elektricitet med kärnkraft. Under denna tid har en stor del av hanteringssystemet för att ta hand om det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet från driften av kärnkraftsreaktorerna byggts upp.

För att ta hand om det använda kärnbränslet återstår att bygga och driftsätta delarna för inkapsling och slutförvaring. I detta ingår att bygga en anläggningsdel för inkapsling av det använda kärnbränslet vid Clab, att utveckla behållare för transporter av kapslar med använt kärnbränsle och att bygga ett slutförvar där kapslarna ska deponeras. För det låg- och medelaktiva avfallet ska SFR byggas ut, behållare för transporter av långlivat avfall utvecklas och på längre sikt ska även ett slutförvar för långlivat avfall byggas, SFL.

Befintliga system och anläggningar måste löpande underhållas och moderniseras. Detta görs bland annat med tanke på att de planerade drifttiderna för de svenska reaktorerna förlängts, vilket medför att även drifttiden för avfallssystemet anpassas efter det.

Forskning och utveckling för slutförvaring av kärnavfall och inkapsling av använt kärnbränsle behöver i många delar utföras i realistisk miljö och i full skala. För detta ändamål har SKB tre laboratorier: Äspölaboratoriet, Kapsellaboratoriet och Bentonitlaboratoriet. Dessa ger också en möjlighet att demonstrera att slutförvarens barriärer kan tillverkas och installeras med den kvalitet som krävs för att uppfylla kraven på långsiktig säkerhet.

Handlingsplan

Reaktorerna i Forsmark och Oskarshamn planeras att drivas i 60 år, liksom reaktorerna Ringhals 3 och 4. Drifttiden för Ringhals 1 och 2 planeras till 50 år. Dessa tider är viktiga utgångspunkter för SKB:s planering. Beaktat att alla reaktorerna har tagits ur drift 2045 och utvecklats omkring 2052, så kommer SKB:s tre slutförvar (Kärnbränsleförvaret, SFR och SFL) att kunna vara förslutna om cirka 60 år.

I handlingsplanen redovisas översiktligt de åtgärder som behövs för att genomföra SKB:s åtaganden samt när ansökningar och andra lagstadgade redovisningar för anläggningarna planeras att lämnas in.

Processen att uppföra och ta en ny anläggning eller anläggningsdel i drift genomgår olika faser. I mars 2011 lämnade SKB in en ansökan enligt kärntekniklagen för slutförvaring av använt kärnbränsle och en ansökan enligt miljöbalken för KBS-3-systemet. En ansökan enligt kärntekniklagen för inkapslingsanläggningen lämnades in 2006. Den kompletterades 2009 avseende en sammanslagning av inkapslingsanläggningen och Clab till en integrerad anläggning, Clink, och 2011 avseende delar som rör KBS-3-systemet. Tillståndsprövningen pågår och SKB besvarar löpande frågor och begäranden om kompletteringar från SSM. Byggstart för Kärnbränsleförvaret och inkapslingsdelen av Clink beräknas till 2019 respektive 2021. Detta för att dessa anläggningar ska kunna tas i drift samtidigt 2029.

I dag har SKB tillstånd att lagra 8 000 ton bränsle i Clab. Genom att använda så kallade kompakt-kassetter kan lagringskapaciteten utökas. SKB planerar att ansöka om tillstånd för detta 2018. Clab har varit i drift i cirka 30 år och i framtiden kommer vissa uppgraderingar av systemen och utbyten av komponenter att behövas. En systeminventering har påbörjats för att undersöka behovet av förbättringar.

SKB planerar att under våren 2014 ansöka enligt kärntekniklagen och miljöbalken om att bygga ut SFR. Det utbyggda förvaret bedöms kunna tas i drift 2023 för att möta kärnkraftsindustrins behov att deponera kärnavfall från driften och utvecklingen av kärnkraftsreaktorerna.

Omkring 2030 planerar SKB att ansöka om att få uppföra nästa slutförvar, SFL. I nuläget planeras anläggningen kunna tas i rutinmässig drift cirka 2045.

Den relativt långa tidshorisont som SKB:s planering omfattar, innebär att det med tiden uppstår ändrade förutsättningar. SKB:s planering måste kunna hantera sådana ändringar. I många fall förväntas detta endast medföra smärre modifieringar, utan större ändringar av den långsiktiga planen.

Del II Låg- och medelaktivt avfall

Del II omfattar såväl nuvarande som planerat omhändertagande av låg- och medelaktivt avfall, det vill säga avfall som uppstår i samband med drift och avveckling av de kärntekniska anläggningarna i Sverige och övrigt radioaktivt avfall från industri, forskning och sjukvård. I detta arbete utgör erfarenheter från driften av SFR en viktig kunskapsgrund för utvecklingen och uppbyggnaden av nya slutförvarsanläggningar.

Hantering av låg- och medelaktivt avfall

SFR är en bergrumsanläggning under havet i Forsmark med cirka 60 meters bergtäckning, vilken nås via tillfartstunnlar från markytan. SFR har varit i drift sedan 1988 och drivs sedan 2009 av SKB. När SFR byggdes var avsikten att anläggningen skulle vara i drift fram till och med 2010, då kärnkraftverken enligt dåvarande planering skulle vara avstängda. Sedan dess har de planerade drifttiderna för kärnkraftverken förlängts och SKB driver ett program för avhjälpande och förebyggande underhåll med syfte att upprätthålla säker drift, personsäkerhet och anläggningstillgänglighet.

Innan det kortlivade låg- och medelaktiva avfallet transporteras till SFR, behandlas det hos avfallsproducenterna. Förutom att förpacka avfallet kan syftet med behandlingen vara att reducera volymen eller modifiera de fysikaliska och kemiska egenskaperna. Avfallsproducenterna arbetar löpande med att minska avfallsvolymer genom att reducera inflödet av material på kontrollerad sida och genom att friklassa och källsortera material. Förbättrad teknik för att rena luft och processvatten bidrar till att reducera utsläpp av radioaktiva ämnen till omgivningen.

Långlivat låg- och medelaktivt avfall mellanlagras i dag antingen i Clabs bassänger, i kärnkraftverkens egna förvaringsbassänger eller torrt i mellanlager på kärnkraftverken. Dessutom finns långlivat avfall i ett mellanlager på Studsviks industriområde. Där finns bland annat historiskt avfall som hanteras av AB SVAFO och avfall från Studsvik Nuclear AB:s verksamhet. Förutsättningarna för att etablera ett centralt mellanlager för långlivat avfall kommer att utredas.

Utbyggnad av Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall

SKB planerar att bygga ut SFR för att få kapacitet att slutförvara tillkommande kortlivat låg- och medelaktivt avfall från drift och avveckling av de kärntekniska anläggningarna. Den planerade utbyggnaden innebär att anläggningens kapacitet ökar och att den får utrymme för nio stycken reaktortankar. Uppskattningen av mängden avfall som avses deponeras i SFR, omfattas av en rad osäkerheter. En del av dessa är svåra att förutse, såsom ändringar i lagar och politiska beslut, ändrade driftsbetingelser eller förändrade drifttider för kärnkraftverken. Utbyggnaden av SFR dimensioneras också för att möjliggöra mellanlagring av långlivat avfall, till exempel hårdkomponenter från kärnkraftverken.

Inför ansökningarna om utbyggnad av SFR har en lokaliseringsutredning genomförts. Denna visar att en utbyggnad av befintligt SFR medför att ändamålet med verksamheten uppnås med minsta intrång och olägenhet för människors hälsa och miljö. Platsen har undersökts, en platsbeskrivande modell och en layout har tagits fram. Utbyggnaden kommer att placeras på ett större djup än den befintliga anläggningen. Huvudskälet till detta är att undvika vattenförande strukturer intill den befintliga delen av SFR.

Utformningen av de tekniska barriärerna i den utbyggda delen av SFR kommer att skilja sig från utformningen av den befintliga anläggningen.

Slutförvaret för långlivat avfall

SFL blir det minsta av SKB:s slutförvar och det planeras att tas i drift sist. För SFL är det flera viktiga milstolpar som måste passeras innan det ska tas i reguljär drift, såsom val av förvarskoncept och plats, undersökningar av platsen, utvärdering av den långsiktiga säkerheten, projektering, framtagning av ansökningar med tillhörande tillståndsprovning samt uppförande av anläggningen.

Arbetet med val av slutförvarskoncept för SFL har inletts. Det följer i huvudsak den metodik som SKB använt tidigare för systemanalys av olika lösningar för omhändertagande av använt kärnbränsle. Studien som ska redovisas i slutet av 2013 visar att SFL kommer att bygga på geologisk deponering. I anslutning till detta utreds olika alternativ för hantering och konditionering av avfallet, lämpliga avfallskollin och tekniska barriärer. Dessa utredningar kopplar också till den teknikutveckling som planeras för SFL. Sedan Fud-program 2010 har SKB hållit samråd med SSM avseende långlivat låg- och medelaktivt avfall.

Markförvar

I dag finns markförvar för mycket lågaktivt driftavfall på industriområdena vid kärnkraftverken Forsmark, Oskarshamn och Ringhals. Det finns dessutom ett markförvar i Studsvik. Cirka hälften av det kortlivade mycket lågaktiva avfallet från avvecklingen av kärnkraftverken skulle kunna slutförvaras i markförvar i stället för i SFR. SKB utreder därför möjligheten att bygga ett centralt markförvar.

Teknikutveckling för slutförvaring av låg- och medelaktivt avfall

Den teknikutveckling som SKB bedriver inför utbyggnaden av SFR är till stora delar inriktad på val av barriärer och material samt utveckling av metoder för att tillverka och uppföra dessa. Erfarenheter från SFR, som varit i drift i cirka 25 år, utgör en viktig utgångspunkt för detta arbete. En genomgång av statusen hos barriärerna i bergsalen för medelaktivt avfall (BMA) visar att det finns skador på betongbarriärerna som orsakats av armeringskorrosion eller härstammar från avsvälningen efter gjutningen av barriärerna. Detta medför att SKB bland annat kommer att ta fram recept och metoder för gjutning av betongbarriärer utan armering. De skador på BMA som identifierats kommer att åtgärdas.

Teknikutvecklingen för SFL omfattar metoder och tekniska lösningar för konditionering av avfall, behållare och tekniska barriärer för slutförvaret. Koncept för ett antal behållare för SFL-avfall har tagits fram för att möjliggöra en rationell hantering. I konceptstudien för SFL har SKB utvecklat fyra olika barrärlösningar, tre utgörs av enskilda tekniska barriärer av betong, bentonit respektive bergkross/grus och den fjärde är en kombination av de tre. I studien, som presenteras i slutet av 2013, kommer SKB att redovisa vilket eller vilka koncept som ska ingå i en planerad säkerhetsvärdering. Teknikutvecklingen för SFL kommer att fokusera på valt eller valda koncept.

Avveckling av kärntekniska anläggningar

Enligt lagen (1984:3) om kärnteknisk verksamhet är den som har tillstånd till kärnteknisk verksamhet skyldig att på ett säkert sätt avveckla sina anläggningar där verksamhet inte längre ska bedrivas. Avvecklingen ska redovisas i planer där detaljeringsgraden på redovisningen ökar vartefter respektive anläggning närmar sig avvecklingsskedet.

Avveckling omfattar avställningsdrift, servicedrift samt nedmontering och rivning. Under nedmonteringen och rivningen pågår de aktiviteter som behövs för att anläggningen ska kunna friklassas. De första kommersiella reaktorerna i Sverige som kommer att avvecklas är reaktorerna i Barsebäck och Ågesta.

SKB har fått i uppdrag att delta i planering och genomförande av den avvecklingen av kärnkraftverken. SKB samordnar planeringen så att generella metoder och rutiner för avvecklingsarbetet används, vilket även innefattar beräkningar av avfallsvolymer, nuklidinventarium och kostnader.

Studierna för avvecklingen av alla de svenska kärnkraftverken, inklusive Ågesta, har nu färdigställt. De redovisar uppskattningar av mängden avfall och kostnaderna för avveckling av respektive anläggning. Sedan Fud-program 2010 har tillståndshavarna för reaktorerna tillsammans med SKB hållit samråd med SSM inom området avveckling.

Del III Använt kärnbränsle

Ett viktigt mål för SKB:s verksamhet är att på ett säkert sätt ta hand om det använda kärnbränslet. Bränslet transporteras från kärnkraftverken med fartyg till Clab i Oskarshamn där det mellanlagras i väntan på slutförvaring. För att slutligen ta hand om det använda kärnbränslet ska en inkapslingsdel byggas intill mellanlagret Clab och ett slutförvar för använt kärnbränsle byggas i Forsmark. Del III av detta Fud-program fokuserar på den teknikutveckling som behövs för att kunna projektera, uppföra och driva slutförvarssystemet för använt kärnbränsle.

Teknikutveckling

Som framgår av de inlämnade ansökningarna för Clink och Kärnbränsleförvaret har en referensutformning för barriärerna för långsiktig säkerhet som uppfyller konstruktionsförutsättningarna för KBS-3-systemet fastställts. Samtidigt har en genomförbar väg mot produktion och kontrollprogram presenterats.

Den struktur med uppdelning av teknikutvecklingen i ett antal produktionslinjer som SKB presenterat i tidigare Fud-program har behållits och vidareutvecklats i Fud-program 2013. Detta innebär att utvecklingsarbetet för barriärerna för långsiktig säkerhet genomförs inom produktionslinjer för bränsle, kapsel, buffert, återfyllning, förslutning och bergutrymmen. För buffert, återfyllning och förslutning finns flera gemensamma frågeställningar och därför integreras utvecklingen för dessa produktionslinjer. Vidare utvecklas tekniska system exempelvis för logistik och för maskiner som är unika för slutförvarsanläggningen.

Fortsatt teknikutveckling bedrivs för att gå från principlösningar till lösningar som är anpassade till en industrialiserad process med fastställda krav på kvalitet, kostnad och tidsåtgång. En stor del av det återstående utvecklingsarbetet består av att bygga upp ett produktionssystem med tillhörande kvalitetskontroller.

För att styra det forsknings-, utvecklings- och demonstrationsarbete som behövs för att driftsätta anläggningarna för inkapsling och slutförvaring av använt kärnbränsle, har den leveransstyrmodell som SKB presenterade i Fud-program 2010 tillämpats och utvecklats. Enligt leveransstyrmodellen indelas teknikutvecklingen i fyra faser: konceptfas, konstruktionsfas, implementeringsfas samt drift- och underhållsfas. För varje fas finns en specifikation för vad som ska ha uppnåtts och vilka underlag som ska ligga till grund för beslut om att gå vidare med nästa fas i utvecklingen.

Bränslehantering

Aktiviteter genomförs för att stegvis förbättra kunskapsläget om det använda kärnbränslet och dess egenskaper. Detta görs för hela KBS-3-systemets behov. Arbetet omfattar både beräkningar av källstyrkor och källtermer. Här ingår även att redovisa radiologiska egenskaper för bränsle med olika utbränningar och avklingningstider. För mellanlagret för använt kärnbränsle genomförs ett program för mätning av resteffekt, vilket inverkar på flera delar av KBS-3-systemet. I det fortsatta arbetet ska kriticitetsanalyser för SKB:s nuvarande och framtida anläggningar genomföras och den valda metoden för att torka bränslet innan det kapslas in, ska utvärderas.

Dessutom presenteras en plan för hur bränsle som kräver särskild hantering ska omhändertas. Detta gäller skadat bränsle och bränsle av udda typer.

Kapsel

Referensmetoder för tillverkning av kapselns komponenter samt svetsning av lock och botten har valts. Metoderna innebär att kapslar kan produceras som uppfyller ställda krav med reproducerbarhet och möjlighet till industrialisering.

Utvecklingen av kapseln är inne i konstruktionsfasen. Tillsammans med Posiva planerar SKB insatser som syftar till att fastställa kapselns referensutformning. Arbetet med analys av kapselns mekaniska hållfasthet fortsätter med beräkningar av olika lastfall som kapseln kan utsättas för i slutförvaret och vid hantering i anläggningarna.

SKB:s produktionssystem för kapslar består av ett antal externa leverantörer av kapselns olika komponenter. SKB har för avsikt att uppföra en kapselabrik där komponenterna sätts samman och kapslarnas egenskaper slutkontrolleras. I denna fråga samarbetar SKB med Posiva eftersom en gemensam kapselabrik kan innebära samordningsvinster.

Buffert, återfyllning och förslutning

När ansökningarna lämnades in 2011 hade utvecklingen av buffert och återfyllning passerat konceptfasen. Därefter har fortsatt teknikutveckling bedrivits inför systemkonstruktion för buffert, återfyllning och pluggar i deponeringstunnlar. Utvecklingen av förslutningen hade inte nått lika långt, men fortsatt utveckling har genomförts för att färdigställa arbetet i konceptfasen.

Under kommande Fud-period kommer detaljkonstruktionen för buffert, återfyllning och pluggar att påbörjas. Dessutom genomförs studier för att fastställa produktionssystemet, med dess kvalitetskontroller, för tillverkningen av buffert- och återfyllningsblock samt pelletar. Dessutom planeras fullskaliga installationstester av både buffert och återfyllning.

Sedan Fud-program 2010 har den yttre sektionen av Prototypförvaret i Äspölaboratoriet brutits. Återfyllningen samt bufferten och kapslarna i sektionens två deponeringshåll har återtagits. Sammanställning och utvärdering av resultaten från fältarbete och laboratorieprogram pågår och den preliminära slutsatsen är att barriärerna i stort sett har utvecklats som förväntat.

Berg

Teknikutvecklingen för berg omfattar detaljundersökningar, projektering, byggande och underhåll av Kärnbränsleförvarets undermarksutrymmen. Utvecklingsarbetet omfattar även metoder för undersökningar och modellering. Vidare ingår bergbyggande, inklusive tätnings- och förstärkningsåtgärder samt utveckling av specialutrustningar med fokus på de bergförhållanden som råder i Forsmark.

Sedan Fud-program 2010 har SKB tagit fram ett ramprogram för detaljundersökningar. Under perioden har Äspölaboratoriet byggts ut med nya tunnlar, vilket har gett möjligheten att integrera detaljundersökningar och projektering. Här har även observationsmetoden kunnat tillämpas tillsammans med bergarbeten. I de nya tunnarna ska också metoder för detaljundersökningar testas. Uppföljning kommer att ske för att se hur väl de ställda kraven på tunneldrivningen lyckats minimera sprängskadezonen, speciellt i golvet.

Metodikerna för bergprojektering och tillämpningen av observationsmetoden behöver vidareutvecklas. Detta gäller i första hand strategier för detaljanpassning av deponeringsområden och samordning av detaljundersökningar och byggproduktion.

Metoder och utrustning för detaljundersökningar med tillhörande modellering kommer också att utvecklas. Utvecklingen sker i ett första steg inför bygget av Kärnbränsleförvarets tillfartstunnlar och i ett andra steg inför utbyggnaden av deponeringsområdena.

Tekniska system

Många av de maskiner, fordon och tekniska system som kommer att användas i Kärnbränsleförvaret och Clink för hantering och transport av kapslar, buffert- och återfyllningsmaterial etc, är specifika för SKB:s verksamhet och finns inte att köpa på den öppna marknaden. De måste ha hög drifttillgänglighet och kunna fungera tillsammans med övriga maskiner och tekniska system och vara användarvänliga för personalen.

Teknikutvecklingen av SKB:s specifika system görs stegvis och tar flera år, vilket gör att den behöver starta långt innan utrustningen behöver finnas på plats. För verifieringar och valideringar av systemen behövs det i vissa fall prototyper. Delar av dagens teknikutveckling handlar därför om utveckling och konstruktion av prototyper. Exempel på detta är prototypen av deponeringsmaskinen som vidareutvecklats och testats i Äspölaboratoriet, liksom den staplingsrobot som utvecklas för att installera återfyllningsblock i deponeringstunnlarna.

Horisontell deponering – KBS-3H

Tillsammans med Posiva studerar SKB om horisontell deponering av kopparkapslar (KBS-3H) kan utgöra ett alternativ till vertikal deponering, som utgör SKB:s referensutformning. Pågående projekt pågår fram till 2016 och därefter kommer en utvärdering av KBS-3H att genomföras. Beslut och planering för fortsatt utveckling av KBS-3H sker efter denna utvärdering.

Del IV Forskning för analys av långsiktig säkerhet

Del IV beskriver SKB:s naturvetenskapliga forskningsprogram vilket drivs utifrån behovet av att analysera säkerheten vid slutförvaring av radioaktivt avfall och använt kärnbränsle. Forskningen innefattar både övergripande frågor, som är gemensamma för flera förvarssystem, och frågor som relaterar till ett specifikt förvarssystem. Det innebär att forskningsprogrammet är utformat för att täcka behoven för såväl Kärnbränsleförvaret, SFR och på sikt även för SFL.

Den vetenskapliga förståelsen av frågor som är relevanta för den långsiktiga säkerheten är väl utvecklad. Detta till följd av decenniers forskning inom det svenska programmet men också inom andra länders nationella program och internationella samarbetsprojekt.

Forskningsinsatserna för att förstå Kärnbränsleförvarets utveckling och säkerhet har lett till förståelse av centrala processer som kopparkorrosion, skjuvning av kapslar och andra potentiella orsaker till kapselbrott, samt av viktiga processer relaterade till fördröjning av radioaktiva ämnen. I säkerhetsanalysen SR-Site visade SKB att det går att bygga ett slutförvar för använt kärnbränsle som uppfyller SSM:s krav på långsiktig säkerhet. Forskningen om processer av betydelse för säkerheten fortsätter. Det gäller särskilt faktorer som SR-Site visat bidrar till risk och där förutsättningarna för analysen kan förbättras genom ytterligare forskningsinsatser.

Vad gäller det kortlivade låg- och medelaktiva avfallet är SKB mitt inne i en utvärderingsfas för SFR. Den fortsatta forskningen för detta avfall kommer till stor del att styras av resultaten från den pågående säkerhetsanalysen för SFR, SR-PSU. För det långlivade låg- och medelaktiva avfallet befinner sig arbetet på konceptstadiet. Insatser som specifikt berör det långlivade avfallet kommer att konkretiseras vartefter, även om en hel del processer sannolikt liknar dem som sker i SFR och därmed kan samstuderas.

Säkerhetsanalys

Säkerhetsanalysen är det instrument som används av såväl SKB som SSM för att bedöma om ett förvar för radioaktivt avfall uppfyller de myndighetskrav på långsiktig säkerhet som ställs. Metodiken för analysarbetet har utvecklats under lång tid, parallellt med KBS-3-systemets utveckling. Under senare år har utvecklingen till största delen genomförts och rapporterats i samband med genomförandet av säkerhetsanalyserna, senast inom SR-Site.

Behoven under kommande Fud-period gäller kompletterande utveckling av metoder för sensitivitetsanalyser och radionuklidtransport, samt en vidareutveckling av kvalitetssäkringen av SKB:s säkerhetsanalyser. Dessutom finns beredskap att hantera metodikrelaterade synpunkter som eventuellt kan komma inom ramen för SSM:s pågående granskning av säkerhetsanalysen SR-Site.

Klimatutveckling

SKB:s klimatforskning berör och påverkar flera andra forskningsområden. Klimatrelaterade processer som tillväxten av inlandsisar och permafrost kan påverka havsytans nivå, grundvattenflöde, grundvattenkemi, spänningar i jordskorpan och inte minst livsbetingelserna vid markytan.

Fokus ligger inte enbart på global uppvärmning eller på att bestämma exakt när nästa istid inträffar utan det viktiga är att identifiera och beskriva ett flertal tänkbara framtida klimatutvecklingar. Tillsammans ska de täcka den osäkerhet som finns kring klimatutvecklingen under mycket långa tidsperspektiv. Klimatfallen utgör exempel dels på tänkbara klimatutvecklingar, dels på gränssättande

extremfall för analysen av olika funktioner hos förvaren. Behoven skiljer sig delvis för de olika förvaren till följd av att de placeras på olika djup, använder barriärer av olika material och har olika lång analysperiod.

För Kärnbränsleförvarets utveckling är det särskilt viktigt att studera processer som skulle kunna påverka bufferten och kapseln upp till en miljon år i framtiden. De kommande insatserna handlar till stor del om att öka kunskapen om inlandsisars variation historiskt sett. Detta för att kunna sätta gränser för hur mäktiga framtida inlandsisar skulle kunna bli. Viktiga frågor handlar också om vad som händer med förvaret under en istid och hur de hydrogeologiska förhållandena ser ut under en inlandsis. För att förbättra kunskapen om dessa frågor driver SKB tillsammans med motsvarande organisationer i Finland och Kanada ett större forskningsprojekt på Grönland, Greenland Analogue Project.

För analysen av den långsiktiga säkerheten hos SFR är den förväntade klimatutvecklingen under det närmaste tiotusentalet åren av större vikt. Här handlar det till exempel om att få en uppfattning om när permafrost tidigast skulle kunna bildas och hur djupt den kan gå under den aktuella analysperioden.

Kortlivat låg- och medelaktivt avfall

Det kortlivade låg- och medelaktiva avfallet är mycket varierat och komplext i sin karaktär. Avfallets egenskaper vid förslutning beror inte bara på avfallsmaterialen, utan också på avfallsbehållarna som avfallet är placerat i och hur avfallet har konditionerats. Egenskaperna vid förslutning, det så kallade initialtillståndet, utgör startpunkt för säkerhetsanalysen. För att uppnå initialtillstånden för avfallet i säkerhetsanalyserna för SFR, regleras de olika avfallstypernas innehåll av acceptanskriterier och typbeskrivningar.

När förvaret försluts och vattenmättas kommer avfallet att interagera med det inträngande grundvattnet och olika processer tar vid. Sedan Fud-program 2010 har en rapport som behandlar dessa processer tagits fram. Dessutom har en uppdaterad uppskattning av det totala material- och radionuklidinventariet vid förslutning av SFR tagits fram, som utöver driftavfall även innefattar avfall från nedmontering och rivning av de svenska kärntekniska anläggningarna. Den fortsatta forskningen kring kortlivat låg- och medelaktivt avfall kommer till stor del att styras av resultaten från den säkerhetsanalys som nu genomförs inom SR-PSU.

Långlivat låg- och medelaktivt avfall

SFL befinner sig i konceptstadiet och SKB planerar för ett förvar med fördröjande säkerhetsfunktion. På så sätt kommer sannolikt många av de komponenter och material som använts i SFR att återfinnas även i SFL. Grundvatten kommer att tränga in efter förslutning och interagera med avfallet. Detta innebär att de processer som förväntas ske i SFL i stor utsträckning kommer att likna de som sker i SFR och en hel del av forskningen kan därmed samordnas med motsvarande program för det kortlivade avfallet. Specifika forskningsbehov för långlivat låg- och medelaktivt avfall kommer att identifieras i takt med att utformningen av SFL och dess inventarium konkretiseras.

Betongbarriärer

Betongbarriärer med huvudfunktionen att fördröja utsläpp av radionuklider finns i SFR och kommer sannolikt även att förekomma i SFL. Fördröjningen uppnås dels genom att radionukliderna sorberar på betongen, dels genom att betongkonstruktionerna minskar vattenflödet genom förvarsutrymmen och avfall. Dessa funktioner åstadkoms bäst med en sprickfri betongbarriär. Den forskning som görs för betongbarriärer går därför ut på att utveckla recept och metoder för betonggjutning samt att öka förståelsen kring degradering av betong.

Bränsle

Så länge kopparkapseln som innesluter bränslet i Kärnbränsleförvaret är intakt, kan inga radioaktiva ämnen spridas från förvaret. Om det skulle gå håll på en kapsel och vatten tränger in i kapseln är bränslets egenskaper avgörande för om och när det kan komma ut radioaktiva ämnen från kapseln i

berget. Bränslet, som generellt löser upp sig mycket långsamt i det vatten som finns i förvarsmiljön, kan därmed fördröja eventuell spridning av radioaktiva ämnen. Därför är forskningen kring bränsleupplösning ett område för SKB:s fortsatta insatser inom bränsleområdet. Till exempel planeras ytterligare insatser för att ta fram data angående bränsleupplösning under slutförvarsliknande förhållanden, samt insatser för att belysa mekanismerna för de olika processerna som bidrar till bränsleupplösning.

Vissa radioaktiva ämnen har under tiden i reaktorn vandrat mot bränslekutsarnas yta och sitter därmed mera löst bundna till bränslet. Vid ett eventuellt kapselbrott är det dessa ämnen som löser sig snabbare än bränslematrisen och avgör den initiala mängden radionuklider som frigörs och skulle kunna transporteras till markytan. Det finns indikationer på att högutbrända bränslen innehåller större andel löst bundna radioaktiva ämnen, vilket föranleder fortsatta forskningsinsatser kring egenskaperna hos högutbrända bränslen. Forskning bedrivs även för att undersöka nya typer av bränslen, exempelvis med tillsatts av krom som tas fram för att optimera bränslets funktion i reaktorerna. Undersökningar av dessa nya bränsletyper sker i stor utsträckning i internationellt samarbete.

Kapsel

Kopparkapseln är den inneslutande barriären i KBS-3-förvaret. I referensscenariot i SR-Site håller kapseln under hela analysperioden. Det finns två situationer som skulle kunna orsaka genomgående skador på kapseln – mekaniska belastningar och kopparkorrosion. Centrala frågor inom det förstnämnda området handlar om hur stora isostatiska laster kapseln tål och hur stora skjuvrörelser i berget som kapseln kan stå emot. Koppars krypegenskaper är i detta sammanhang ett viktigt forskningsområde.

De största forskningsinsatserna görs inom området kopparkorrosion. Det finns till exempel fenomen där kunskapen om de bakomliggande processerna behöver förbättras för att kunna bedöma om och hur dessa kan påverka kapselns hållbarhet. Det gäller särskilt det faktum att det finns experiment utförda med koppar i syrgasfritt vatten och som genererar vätgas i mängder långt större än vad termodynamiska data förutsäger.

Samtidigt fortsätter arbetet med att minska osäkerheterna vad gäller de processer som faktiskt kan påverka kapselns hållbarhet på lång sikt. Ett exempel är sulfidkorrosion som i SR-Site var den korrosionsprocess som gav störst riskbidrag och därmed också finns med som en viktig fråga i den fortsatta forskningen. Spänningskorrosion är en process som också kräver fortsatta insatser.

Buffert och återfyllning

I Kärnbränsleförvaret omges kapseln av en skyddande buffert av bentonitlera. Lerans huvuduppgift är att begränsa grundvattenflödet in till kapseln. Om en kapsel skulle bli otät kommer bufferten även att fördröja transporten av radioaktiva partiklar ut i berget.

I samband med säkerhetsanalysarbetet har det framkommit att bufferten under vissa förhållanden skulle kunna lösas upp och föras ut sprickor i berget, så kallad bufferterosion. Detta skulle kunna hända i samband med att stora mängder smältvatten med låg kalciumhalt från en inlandsis når ner till förvaret. De största forskningsinsatserna handlar därför om att klargöra under vilka förhållanden leran inte är stabil, något som genomförs i ett omfattande experimentprogram, såväl i egna projekt som i större samarbetsprojekt inom EU.

Viktiga insatser görs också för att utveckla ett program för karakterisering av lera. Här har viktiga framsteg gjorts tack vare försöken med alternativa buffertmaterial som pågår i Äspölaboratoriet. Det gäller till exempel förståelsen för mekanismerna bakom förändringar i leran, så kallad homogenisering. Nya modeller har tagits fram för att bättre beskriva denna process i leran och utvecklingen inom området fortsätter.

Bentonitlera kommer även att användas för att återfylla deponeringstunnlarna i Kärnbränsleförvaret. Den forskning som bedrivs kring bufferten täcker även behoven som uppkommer vid utvecklingsarbetet för återfyllningen.

Forskningen kring buffertfrågor i Kärnbränsleförvaret är till stora delar tillämpbar för förhållandena i SFR och kommer att kunna tillämpas också för SFL. Vissa insatser görs särskilt för att öka kunskapen om hur bentonitlera och betong fungerar tillsammans.

Geosfär

Forskningen om geosfären omfattar fyra ämnesområden: geologi, hydrogeologi, hydrogeokemi och bergets transportegenskaper. Inom dessa områden syftar kommande insatser till att öka kunskapsbasen om de berggrundsförhållanden som har stor betydelse för utfallet i säkerhetsanalyserna. SR-Site visar tydligt vilka egenskaper och processer som har störst betydelse för Kärnbränsleförvaret. Det handlar om att öka kunskapen om hur egenskaperna varierar i bergvolymen och som funktion av närvarande bergarter. SKB förbättrar även de modellverktyg som används för att beskriva och prediktera de processer som äger rum i berget över mycket lång tid.

Inom ämnesområdet geologi fokuseras kommande insatser på att öka kunskapen om spjälkning förorsakad av spänningar i berget och av höjd temperatur, metodik för identifiering av stora sprickor, fortsatta studier av glacialt inducerade förkastningar, samt seismiska mätningar som stöd för jordskalvsmodellering och allmän kunskapsuppbyggnad om seismicitet i svensk berggrund. Diskreta spricknätverksmodeller, vilka utgör en bas för analys av berg rörelser såväl som för analys av grundvattenflöde och ämnestransport i sprickor, är ett stort insatsområde med bäring på både hydrogeologi, geologi och bergmekanik.

Insamling av data som rör det ytliga systemets hydrogeologi sker främst inom ramen för de undersökningar som görs på Grönland. Målet är att kunna beskriva hur flödet förändras och varierar under en period som domineras av permafrost. Resultaten används bland annat i säkerhetsanalysen för utbyggnaden av SFR. Hydrogeologiska insatser på djupa grundvattensystem handlar om att integrera data och modeller med andra ämnesområden (geokemi, bergmekanik och transport) samt att underhålla och förbättra de koder som används för flödes- och transportberäkningar. Flödesförhållanden under en glaciation med omfattande permafrost har konsekvenser för situationen på förvaringsdjup. Undersökningsdata från projektet på Grönland används både för att förstå flödesprocesserna och optimera modellverktygen.

Geokemiområdet har fortsatt fokus på reaktioner mellan vatten och berg samt effekter av vattnets rörelse i spricksystemet. Insatser riktas på att i modellerna integrera de geokemiska förhållandena med hydrogeologiska förhållanden och bergets transportegenskaper. Dessutom är mikrobiella processer ett allt viktigare delområde. Här studeras bland annat acetogens eventuella betydelse, samspelet mellan mikrober och virus i berget, biofilmer på sprickytor samt mikrobiella processer i närvaro av vätgas, metan och sulfid.

Programmet för hur lösta ämnen transporteras i grundvatten omfattar studier av flödesrelaterat transportmotstånd, kanalbildning (bredd och frekvens) och diffusion in i stagnanta zoner. Planeringen omfattar även en förbättring av K_d -konceptet (koncept för att beräkna fördelningskoefficienter) där hänsyn tas till de hydrogeokemiska förhållandena i sprickor. Syftet är att kunna använda de nyvunna kunskaperna i kommande säkerhetsanalyser. Internationellt forskningsarbete görs inom SKB Task Force for Groundwater Flow and Transport of Solutes. Modelleringsuppgifter utförs av flera grupper från olika organisationer med underlag från experiment och undersökningar vid Äspölaboratoriet eller andra berglaboratorier.

Ytnära ekosystem

Forskning och utveckling inom området ytnära ekosystem syftar främst till att öka förståelsen för de processer som påverkar transport och ackumulation av radionuklider i ytsystemen samt till utveckling av metodiken för att beräkna och bedöma den radiologiska risken för människors hälsa och för miljön. Stor vikt kommer att läggas på frågeställningar och osäkerheter som har identifierats i arbetet med säkerhetsanalyserna för Kärnbränsleförvaret och utbyggnaden av SFR. Även frågeställningar som identifieras vid förberedelser för analys av det kommande förvaret för långlivat radioaktivt avfall, SFL, finns med i det fortsatta arbetet.

Hittills genomförda studier visar att om radionuklider från ett förvar skulle komma ut i berget och transporteras upp till markytan, kommer dessa så småningom att hamna i lågpunkter i landskapet. Om detta sker till terrestra miljöer kommer recipienten med stor sannolikhet att vara en våtmark eller jordbruksmark. Ett viktigt område för kommande forskningsinsatser inom ytnära ekosystem är därför studier som syftar till att öka förståelsen för processer som styr transport och ackumulation av radionuklider i våt- och jordbruksmarker. Viktigt är också att öka förståelsen för processer som styr transporten av radionuklider från terrestra områden till sjöar och vattendrag.

Kustområdet i Forsmark förändras över tid som en funktion av klimatvariation och strandlinjeförskjutning, vilket påverkar eventuell exponering av människa och miljö för radioaktiva ämnen. För att kunna bedöma konsekvenserna om radionuklider skulle komma ut från ett förvar, krävs kunskap både om landskapsutvecklingen och om hur viktiga processer förändras med ett förändrat klimat. Inom programmet för ytnära ekosystem planeras därför aktiviteter för att vidareutveckla beskrivningen av landskapet och dess utveckling. För att öka förståelsen för hur processer kommer att förändras när klimatet i Forsmark blir kallare, kommer SKB att fortsätta arbetet med att beskriva periglaciala miljöer på Grönland.

När det gäller vidareutveckling av beräkningsmetodik planeras insatser för att ersätta eller komplettera användandet av koncentrationsfaktorer med mekanistiska modeller för retention och biologiskt upptag för att minska osäkerheterna. SKB kommer även att fortsätta utvecklingen av metodiken för dosberäkningar med utgångspunkt från nyvunnen kunskap från biosfärsprogrammet och från tillämpningar av metodiken på genomförda och pågående säkerhetsanalyser.

Andra metoder

SKB följer utvecklingen av andra metoder för att ta hand om använt kärnbränsle utöver KBS-3-metoden. Det gäller främst förutsättningarna för att kunna borra och deponera på stora djup, men även möjligheterna att utnyttja energin i bränslet i nya reaktorer genom separation och transmutation.

Del V Samhällsvetenskaplig forskning

Del V som beskriver samhällsvetenskaplig forskning innehåller två kapitel:

- SKB:s program för samhällsforskning.
- Informationsbevarande över generationer.

SKB:s program för samhällsforskning

SKB genomförde åren 2004–2011 ett program för samhällsforskning. Utgångspunkten för detta har varit att bredda perspektivet på kärnbränsleprogrammets samhällsaspekter samt att ge djupare kunskap och bättre underlag för plats- och projektanknutna utredningar och analyser. Sammanlagt har 18 projekt genomförts inom ramen för de fyra forskningsområden som det samhällsvetenskapliga forskningsprogrammet har omfattat: Socioekonomisk påverkan – samhällsekonomiska effekter, beslutsprocesser, opinion och attityder – psykosociala effekter samt omvärldsförändringar.

SKB menar att forskningsresultaten har bidragit till en djupare förståelse av historiska, ekonomiska och opinionsmässiga aspekter på frågor relaterade till slutförvaring av kärnavfall och därmed bidragit till att öka den allmänna kunskapsbasen för SKB:s arbete. Resultaten har även kommit till användning i SKB:s praktiska arbete och det kan konstateras att de också är relevanta för SKB:s arbete med att slutligt ta hand om det låg- och medelaktiva avfallet.

SKB:s uppfattning är att fortsatta forskningsinsatser på detta område i första hand bör finansieras på sätt som är gängse inom universitet och högskolor, det vill säga genom att olika forskare ansöker om medel hos olika forskningsfinansierande organ, exempelvis statliga eller privata forskningsråd eller motsvarande. SKB avser därför inte att för närvarande initiera ett nytt forskningsprogram av den typ som nu har avslutats.

Informationsbevarande över generationer

Det finns två grundläggande principer för hur information kan föras vidare till framtida generationer – successiv informationsöverföring och information som är riktad direkt till en avlägsen framtid. Alla de länder som arbetar med frågan om informationsbevarade över lång tid är inriktade på successiv överföring. Detta innebär att människor överför informationen till varandra genom till exempel arkiv. Några länder arbetar även med överföring direkt till en avlägsen framtid, varvid så kallade markörer kan användas. Oavsett framtida mottagare är det viktigt att informationen är tillgänglig och lättförståelig.

De viktiga frågorna om informationsbevarande behöver lösas först i samband med att slutförvaret för använt kärnbränsle ska förslutas. Centralt handlar frågeställningen om hur man kan bevara information och kunskap om ett slutförvar för radioaktivt avfall till framtida generationer. Det övergripande målet med SKB:s pågående arbete är därför nu att hitta arbetssätt och kanaler för att fortsättningsvis hålla den frågan aktuell och levande. SKB:s pågående arbete består av olika delar, dels egna forskningsuppdrag, dels deltagande i ett OECD/NEA-projekt och ett samarbete med Andra, SKB:s motsvarighet i Frankrike. Målen med de egna forskningsuppdragen är att vidga kunskapen om hur man ska bevara information och kunskap under lång tid. Detta görs bland annat genom studier av hur dagens kunskap om historiska och mycket gamla företeelser har förvärvats samt hur språk utvecklas och förändras med tiden.

Innehåll

Del I SKB:s verksamhet och handlingsplan

1	Hantering av radioaktivt avfall och använt kärnbränsle	29
1.1	Förutsättningar	29
1.1.1	Gällande regelverk och SKB:s uppdrag	29
1.1.2	Grundläggande principer	30
1.1.3	KBS-3-metoden	31
1.1.4	Det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet	31
1.2	Program för forskning, utveckling och demonstration	33
1.3	Fud-programmen i relation till andra redovisningar till SSM	35
1.4	Finansiering	36
1.5	Beskrivning av avfallssystemet	36
1.5.1	Anläggningar inom systemet för låg- och medelaktivt avfall	36
1.5.2	Anläggningar inom KBS-3-systemet	39
1.5.3	Anläggningar för forskning, utveckling och demonstration	44
2	Handlingsplan	49
2.1	Huvudtidsplan	49
2.2	Handlingsplan för låg- och medelaktivt avfall	49
2.2.1	Kortlivat låg- och medelaktivt avfall	52
2.2.2	Långlivat låg- och medelaktivt avfall	54
2.3	Handlingsplan för använt kärnbränsle	55
2.3.1	Översikt	56
2.3.2	Mellanlagring	58
2.3.3	Inkapsling	58
2.3.4	Transporter	60
2.3.5	Kärnbränsleförvaret	61
3	Flexibilitet vid ändrade förutsättningar	63
3.1	Kärnkraftsreaktorernas drifttider	63
3.2	Drifttagning av det utbyggda SFR	64
3.3	Drifttagning av Kärnbränsleförvaret och Clink	65
3.4	Nya kärnkraftsreaktorer	66
3.4.1	Ersättning av befintliga reaktorer av tredje generationen	66
3.4.2	Framtida snabba reaktorer av fjärde generationen	67

Del II Låg- och medelaktivt avfall

4	Hantering av låg- och medelaktivt avfall	71
4.1	Hantering av kortlivat låg- och medelaktivt avfall	71
4.1.1	Uppkomst av kortlivat låg- och medelaktivt avfall	72
4.1.2	Reducering av kortlivat låg- och medelaktivt avfall	72
4.1.3	Karakterisering av kortlivat låg- och medelaktivt avfall	73
4.1.4	Konditionering av kortlivat låg- och medelaktivt avfall	73
4.2	Hantering av långlivat låg- och medelaktivt avfall	74
4.2.1	Långlivat låg- och medelaktivt avfall	74
4.2.2	Mellanlager för långlivat avfall	74
4.3	SFR – Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall	75
4.3.1	Drift av anläggningen	76
4.3.2	Underhåll	76
4.3.3	Informationshantering vid mellanlagring och deponering	78

5	Utbyggnad av Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall	79
5.1	Samråd	79
5.2	Överordnade krav på anläggningen	79
5.2.1	Mängd kortlivat driftavfall	80
5.2.2	Mängd kortlivat avfall från nedmontering och rivning	80
5.2.3	Osäkerheter i avfallsvolymer	80
5.2.4	Dimensionerande avfallsvolymer	81
5.2.5	Mellanlagring av långlivat avfall	81
5.3	Acceptanskriterier för avfall i SFR	81
5.4	Lokalisering	82
5.5	Platsundersökningar	84
5.5.1	Resultat från undersökningar	84
5.5.2	Modellering och platsbeskrivning	85
5.6	Arbetsmetodik för projektering	86
5.6.1	Anläggningsdelar	86
5.6.2	Stegvis genomförande	86
5.7	Säkerhetsredovisning	88
6	Slutförvaret för långlivat avfall	89
6.1	Samråd med SSM	90
6.2	Handlingsalternativ för hantering av långlivat låg- och medelaktivt avfall	90
6.3	Handlingsalternativ för slutförvaring	94
6.3.1	Utvecklingsstegen till ett driftsatt förvar	94
6.3.2	Tidsplan för drifttagande av SFL	95
6.3.3	Handlingsalternativet sent drifttagande	96
6.3.4	Handlingsalternativet etappvis drifttagande	98
6.4	Uppdatering av referensinventariet	98
6.5	Acceptanskriterier för avfall	101
6.6	Säkerhetsvärdering	101
6.7	Platsvalsprocessen	101
7	Markförvar	103
8	Teknikutveckling för Slutförvaring av låg- och medelaktivt avfall	105
8.1	Slutförvar för kortlivat avfall	105
8.1.1	Översikt av tekniska barriärer	105
8.1.2	Tekniska barriärer för silon	106
8.1.3	Tekniska barriärer för medelaktivt avfall i befintligt SFR	106
8.1.4	Tekniska barriärer för lågaktivt avfall i utbyggd del av SFR	108
8.1.5	Tekniska barriärer för medelaktivt avfall i utbyggd del av SFR	109
8.1.6	Tekniska barriärer för reaktortankar i utbyggd del av SFR	111
8.1.7	Förslutning	112
8.1.8	Borrhålsförslutning	114
8.2	Slutförvar för långlivat avfall	114
8.2.1	Tekniska barriärer	115
8.2.2	Förslutning	121
8.2.3	Behållare	121
8.2.4	Hanteringsutrustning för hårdkomponenter	128
8.2.5	Segmentering av styrtavar	129
9	Ansvar, planering och teknik för avveckling av kärntekniska anläggningar	131
9.1	Samråd med SSM	132
9.2	Ansvarsfördelning	132
9.2.1	Ansvarsfördelning mellan SKB och tillståndshavare till svenska kärnkraftsreaktorer	133
9.2.2	Ansvarsfördelning mellan SKB och tillståndshavare/ägare till Ägesta kraftvärmereaktor	133

9.3	Planering inför avveckling och utveckling av metoder	133
9.3.1	Avvecklingsstrategier	133
9.3.2	Barsebäck Kraft AB:s planering för avveckling och utveckling av metoder	134
9.3.3	Forsmarks Kraftgrupp AB:s planering för avveckling och utveckling av metoder	137
9.3.4	OKG Aktiebolags planering för avveckling och utveckling av metoder	137
9.3.5	Ringhals AB:s planering för avveckling och utveckling av metoder	138
9.3.6	Ågestas planering för avveckling och utveckling av metoder	140
9.3.7	Planering för avveckling av SKB:s kärntekniska anläggningar	141
9.3.8	SKB:s planering för avveckling och utveckling av metoder	142

Del III Använt kärnbränsle

10	Översikt	147
10.1	Introduktion	147
10.2	Utgångspunkter för teknikutveckling	147
10.2.1	Konstruktionsförutsättningar	148
10.2.2	Kvalitetsstyrning och kontroll	148
10.2.3	Leveransstyrmodell	149
10.3	Behov av teknikutveckling	150
10.3.1	Övergripande behov	150
10.3.2	Återtag	150
10.3.3	Horisontell deponering	151
10.4	Milstolpar	151
10.4.1	Underlag till PSAR inför byggstart	152
10.4.2	Start detaljprojektering av inkapslingsdel Clink och kapselabrik	153
10.4.3	Inför byggstart av inkapslingsdel Clink och kapselabrik	153
10.4.4	Underlag till detaljprojektering av tillfarter	153
10.4.5	Passage av nivån under toppförslutning	153
10.4.6	Underlag till detaljprojektering av produktionsbyggnad	153
10.4.7	Underlag till detaljprojektering av deponeringsområde	154
10.4.8	Start samfunktionsprovning av KBS-3-systemet	154
10.4.9	Underlag till förnyad SAR	154
11	Teknikutveckling bränslehantering	155
11.1	Krav och förutsättningar	155
11.2	Nuläge och program	156
11.3	Bränsle som kräver särskild hantering	157
11.4	Dokumentation av bränsle	157
11.5	Källstyrkor och källtermer	157
11.6	Strålskydd och dosuppskattningar	158
11.7	Resteffekt	158
11.8	Vatten och vattenånga	159
11.9	Kriticitet	159
11.10	Bränsle- och kapseloptimering	160
11.11	Kärnämneskontroll	160
12	Teknikutveckling kapsel	163
12.1	Krav och förutsättningar	163
12.2	Nuläge och program	164
12.3	Kapselutformning – analyser av kapseln	166
12.4	Tillverkning och provning av insatser	168
12.4.1	Tillverkning av insatser	168
12.4.2	Provning av insatser	168
12.5	Tillverkning och provning av komponenter i koppar	173
12.5.1	Tillverkning av kopparkomponenter	173
12.5.2	Provning av kopparkomponenter	174

12.6	Förslutning och provning av svetsen	176
12.6.1	Förslutning	176
12.6.2	Provning av svetsar	178
12.6.3	Tillverkning av kapslar i industriell skala	178
12.7	Hantering och deponering av kapslar i Kärnbränsleförvaret	178
13	Teknikutveckling buffert, återfyllning och förslutning	181
13.1	Krav och förutsättningar	181
13.1.1	Buffert	181
13.1.2	Återfyllning och plugg	182
13.1.3	Förslutning	182
13.2	Nuläge och program	183
13.2.1	Buffert	184
13.2.2	Återfyllning	185
13.2.3	Plugg för deponeringstunnlar	186
13.2.4	Förslutning	188
13.3	Materialstudier bentonit	189
13.4	Produktion av buffert och återfyllningskomponenter	189
13.4.1	Produktion av buffertblock och -ringar	189
13.4.2	Produktion av återfyllningsblock	191
13.4.3	Produktion av pelletar för buffert och återfyllning	191
13.5	Hantering och transport av buffert och återfyllning	192
13.6	Installation av buffert och återfyllning	192
13.6.1	Installation av buffert	192
13.6.2	Installation av återfyllning i deponeringstunnlar	193
13.7	Kvalitetsprogram buffert och återfyllning	195
13.8	Pluggning av deponeringstunnlar	195
13.9	Förslutning av Kärnbränsleförvaret	200
13.10	Integrationstester	201
13.11	Prototypförvaret	202
14	Teknikutveckling berg	205
14.1	Krav och förutsättningar	205
14.2	Nuläge och program	206
14.3	Metodik för bergprojektering	208
14.4	Detaljundersökningar	211
14.4.1	Översikt och strategier	211
14.4.2	Undersökningar och modellering	213
14.4.3	Stora sprickor	217
14.4.4	Datasystem för detaljundersökningar	219
14.5	Utförandemetoder och byggnadsmaterial	220
14.5.1	Injektering	220
14.5.2	Berguttag	222
14.5.3	Bergförstärkning	226
14.5.4	Material med lågt pH	226
15	Tekniska system	229
15.1	Krav och förutsättningar	229
15.1.1	Övergripande planering och styrning	229
15.1.2	Allmänt om framtagning av maskiner och tekniska system	229
15.1.3	Utveckling av produktionssystem	231
15.1.4	Strategier och aktiviteter för att nå uppsatta mål	233
15.2	Produkter och processer	234
15.2.1	Logistikstudier	234
15.2.2	Rampfordon	235
15.2.3	Deponeringsmaskin	236
15.2.4	Transportsystemet för buffert- och återfyllningsmaterial	236
15.2.5	System för navigering, maskinkontroll och produktionskontroll	238
15.2.6	Produktionskontrollsystem	239
15.2.7	Produktionsbyggnaden för buffert- och återfyllningsmaterial	239

16	Horisontell deponering – KBS-3H	241
16.1	Utformning av ett KBS-3H-förvar	241
16.2	Nuläge och program	241
16.3	Demonstration i Äspölaboratoriet	242
16.4	Långsiktig säkerhet	243
Del IV Forskning för analys av långsiktig säkerhet		
17	Översikt – forskning för analys av långsiktig säkerhet	247
17.1	Sammanfattning forskningsområden	247
17.2	Forskning kopplad till förvarssystem	252
17.3	Andra metoder	257
17.4	Forskning i Äspölaboratoriet, Nova FoU och europeiskt samarbete	257
	17.4.1 Forskning vid Äspölaboratoriet	257
	17.4.2 Forskningsbreddning vid Nova FoU	258
	17.4.3 Plattform för europeiskt samarbete	259
18	Säkerhetsanalys	261
18.1	Inledning	261
18.2	Metodik för analys av Kärnbränsleförvarets långsiktiga säkerhet	261
18.3	Analys av SFR:s långsiktiga säkerhet	264
19	Klimatutveckling	267
19.1	Klimatscenarier i SKB:s säkerhetsanalyser	267
19.2	Inlandsisodynamik och glacial hydrologi	269
19.3	Denudation	274
19.4	Isostasi, eustasi och strandlinjeförskjutning	275
19.5	Permafrost	277
19.6	Klimat och klimatvariationer	280
19.7	Greenland Analogue Project	284
20	Kortlivat låg- och medelaktivt avfall	289
20.1	Initialtillstånd i avfallet	289
	20.1.1 Variabler	290
	20.1.2 Geometri	290
	20.1.3 Strålningsintensitet	291
	20.1.4 Temperatur	292
	20.1.5 Hydrovariabler	292
	20.1.6 Mekaniska spänningar	293
	20.1.7 Totalt radionuklidinventarium	293
	20.1.8 Materialsammansättning	294
	20.1.9 Vattensammansättning	295
	20.1.10 Gasvariabler	296
20.2	Processer	296
	20.2.1 Översikt av processer	296
	20.2.2 Radioaktivt sönderfall	298
	20.2.3 Stråldämpning och värmealstring	299
	20.2.4 Strålningsinducerad nedbrytning av organiskt material	299
	20.2.5 Vattenradiolys	299
	20.2.6 Värmetransport	300
	20.2.7 Fasändring/frysning	300
	20.2.8 Vattenuptag och transport under omättade förhållanden	300
	20.2.9 Vattentransport under mättade förhållanden	301
	20.2.10 Sprickbildning	301
	20.2.11 Advektiv transport av lösta ämnen	302
	20.2.12 Diffusiv transport av lösta ämnen	302
	20.2.13 Sorption	302
	20.2.14 Kolloidbildning och kolloidtransport	304
	20.2.15 Upplösning, utfällning och omkristallisation	305
	20.2.16 Kemisk degradering av organiska ämnen	306

20.2.17	Vattenuptag/svällning	307
20.2.18	Mikrobiella processer	308
20.2.19	Metallkorrosion	308
20.2.20	Gasbildning och gastransport	310
20.2.21	Speciering av radionuklider	311
20.2.22	Radionuklidtransport i vattenfas	312
20.2.23	Radionuklidtransport i gasfas	312
21	Långlivat låg- och medelaktivt avfall	313
21.1	Initialtillstånd i avfallet	313
21.1.1	Variabler	314
21.1.2	Geometri	314
21.1.3	Strålningsintensitet	315
21.1.4	Temperatur	315
21.1.5	Hydrovariabler	315
21.1.6	Mekaniska spänningar	315
21.1.7	Totalt radionuklidinventarium	316
21.1.8	Materialsammansättning	316
21.1.9	Vattensammansättning	316
21.1.10	Gasvariabler	317
21.2	Processer	317
21.2.1	Översikt av processer	317
21.2.2	Radioaktivt sönderfall	319
21.2.3	Stråldämpning och värmealstring	319
21.2.4	Strålningsinducerad nedbrytning av organiskt material	319
21.2.5	Vattenradiolys	319
21.2.6	Värmetransport	320
21.2.7	Fasändring/frysning	320
21.2.8	Vattenuptag och transport under omättade förhållanden	320
21.2.9	Vattentransport under mättade förhållanden	320
21.2.10	Sprickbildning	321
21.2.11	Advektiv transport av lösta ämnen	321
21.2.12	Diffusiv transport av lösta ämnen	321
21.2.13	Sorption	321
21.2.14	Kolloidbildning och kolloidtransport	322
21.2.15	Upplösning, utfällning och omkristallisation	322
21.2.16	Kemisk degradering av organiska ämnen	322
21.2.17	Vattenuptag/svällning	323
21.2.18	Mikrobiella processer	323
21.2.19	Metallkorrosion	323
21.2.20	Gasbildning och gastransport	324
21.2.21	Speciering av radionuklider	325
21.2.22	Radionuklidtransport i vattenfas	325
21.2.23	Radionuklidtransport i gasfas	325
22	Betongbarriärer	327
22.1	Initialtillståndet hos betongbarriärer	328
22.1.1	Variabler	328
22.1.2	Geometri	329
22.1.3	Temperatur	329
22.1.4	Hydrovariabler	329
22.1.5	Mekaniska spänningar	330
22.1.6	Materialsammansättning	331
22.1.7	Vattensammansättning	332
22.1.8	Gasvariabler	332
22.2	Processer	332
22.2.1	Översikt av processer	332
22.2.2	Värmetransport	334
22.2.3	Fasändring/frysning	334

22.2.4	Vattenuptag och -transport under omättade förhållanden	336
22.2.5	Vattentransport under mättade förhållanden	336
22.2.6	Gastransport och vattenlöslighet	337
22.2.7	Tryck från svällande avfall	337
22.2.8	Tryck från bentonit	338
22.2.9	Sprickbildning	338
22.2.10	Bergutfall	339
22.2.11	Advektion och blandning	340
22.2.12	Diffusion	340
22.2.13	Sorption	340
22.2.14	Kolloidtransport och filtrering	340
22.2.15	Upplösning, utfällning och omkristallisation	340
22.2.16	Porvattenspeciering och betonginteraktioner	342
22.2.17	Mikrobiella processer	343
22.2.18	Metallkorrosion	343
22.2.19	Gasproduktion	344
22.2.20	Speciering av radionuklider	344
22.2.21	Radionuklidtransport i vattenfas	344
22.2.22	Radionuklidtransport i gasfas	344
23	Bränsle	345
23.1	Initialtillstånd	345
23.1.1	Variabler	345
23.1.2	Gapinventarium	345
23.1.3	Gassammansättning	347
23.2	Processer i bränsle/hållrum	347
23.2.1	Översikt av processer	348
23.2.2	Radioaktivt sönderfall	348
23.2.3	Inducerad fission – kriticitet	349
23.2.4	Vattenradiolys	349
23.2.5	Metallkorrosion	350
23.2.6	Bränsleupplösning	351
23.2.7	Speciering av radionuklider, kolloidbildning	355
23.2.8	Heliumproduktion	356
23.2.9	Kemisk omvandling av bränslematrisen	357
24	Kapsel	359
24.1	Initialtillstånd	359
24.1.1	Variabler	359
24.2	Kapselprocesser	360
24.2.1	Översikt av processer	360
24.2.2	Deformation av insats	360
24.2.3	Deformation av kopparkapsel vid yttre övertryck	361
24.2.4	Termisk expansion	365
24.2.5	Deformation från inre korrosionsprodukter	366
24.2.6	Strålpåverkan	367
24.2.7	Spänningskorrosion hos insats	368
24.2.8	Korrosion kopparkapsel	368
24.2.9	Spänningskorrosion kopparkapsel	374
24.2.10	Jordströmmar – läckströmskorrosion	376
24.2.11	Utfällning av salt på kapselytan	377
25	Buffert och återfyllning	379
25.1	Buffert	379
25.2	Återfyllningens krav och funktioner	379
25.3	Bentonitbarriären i silon i SFR	379
25.4	Initialtillstånd	379
25.4.1	Översikt	379
25.4.2	Vatteninnehåll	381
25.4.3	Gasinnehåll	381

25.4.4	Bentonitsammansättning	381
25.4.5	Montmorillonitsammansättning	386
25.4.6	Porvattensammansättning	387
25.4.7	Hydrovariabler	387
25.4.8	Spänningstillstånd	387
25.4.9	Porgeometri	388
25.4.10	Geometri	388
25.4.11	Strålningsintensitet	388
25.4.12	Temperatur	388
25.4.13	Strukturella och kvarlämnade material	388
25.5	Processer	389
25.5.1	Översikt av processer	389
25.5.2	Stråldämpning/värmealstring	391
25.5.3	Värmetransport	391
25.5.4	Frysning	392
25.5.5	Vattentransport vid omättade förhållanden	393
25.5.6	Vattentransport vid mättade förhållanden	398
25.5.7	Gastransport/gaslösning	398
25.5.8	Piping/erosion	400
25.5.9	Svällning	402
25.5.10	Advektion	405
25.5.11	Diffusion	406
25.5.12	Osmos	406
25.5.13	Jonbyte/sorption	408
25.5.14	Montmorillonitomvandling	410
25.5.15	Järn/bentonit	413
25.5.16	Koppar/bentonit	414
25.5.17	Lösning/fällning föroreningar	415
25.5.18	Cementering	416
25.5.19	Kolloidfrigörelse/erosion	417
25.5.20	Strålinducerad montmorillonitomvandling	420
25.5.21	Mikrobiella processer	420
25.5.22	Radionuklidtransport i bufferten	421
26	Geosfär	423
26.1	Initialtillstånd för geosfären	423
26.2	Översikt av processer i geosfären	423
26.3	Värmetransport	424
26.4	Grundvattenströmning	425
26.4.1	Yhydrologi och ytnära hydrogeologi	426
26.4.2	Hydrogeologi i det djupa berget	428
26.4.3	Specifika frågeställningar kopplade till Kärnbränsleförvaret	431
26.4.4	Specifika frågeställningar kopplade till SFR och SFL	432
26.4.5	Task Force för grundvattenflödes- och transportmodellering	433
26.5	Gasströmning/gaslösning	434
26.6	Rörelser i intakt berg	434
26.7	Termisk rörelse	436
26.8	Reaktivering – rörelse längs befintliga sprickor	437
26.9	Sprickbildning	442
26.10	Tidsberoende deformationer	443
26.11	Advektion/blandning – grundvattenkemi	443
26.12	Advektion/dispersion – radionuklidtransport	444
26.13	Diffusion – grundvattenkemi	445
26.14	Diffusion – radionuklidtransport	446
26.15	Reaktioner med berget – grundvattenkemi	447
26.16	Reaktioner med berget – sorption av radionuklider	449
26.17	Mikrobiella processer	451
26.18	Nedbrytning av oorganiskt konstruktionsmaterial	454

26.19	Kolloidomsättning – kolloider i grundvatten	454
26.20	Kolloidomsättning – radionuklidtransport med kolloider	455
26.21	Gasbildning/gaslösning	456
26.22	Metanisomsättning	457
26.23	Saltutfrysning	457
26.24	Modellering	458
26.24.1	DFN	458
26.24.2	Integrerad modellering – termo-hydro-mekanisk utveckling	459
26.24.3	Integrerad modellering – hydrogeokemisk utveckling	461
26.24.4	Integrerad modellering – radionuklidtransport	463
27	Ytnära ekosystem	467
27.1	Sammanfattning	467
27.2	Utgångspunkter för beskrivning och modellering av ytnära ekosystem	468
27.3	Terrestra ekosystem	470
27.4	Akvatiska ekosystem	474
27.5	Biogeokemi	477
27.6	Hydrologi och transport	479
27.7	Effekter av långtidsvariationer	482
27.8	Landskapsutveckling och avlagringar	484
27.9	Radionuklidmodellering	486
27.10	Miljöövervakning	490
27.11	Nationella samarbeten, internationellt arbete samt informationsspridning	490
28	Andra metoder	493
28.1	Separation och transmutation	494
28.2	Djupa borrhål	496
Del V Samhällsvetenskaplig forskning		
29	SKB:s program för samhällsforskning	505
29.1	Översikt	505
29.2	Slutsatser i Fud-program 2010 och dess granskning	507
29.2.1	SKB:s redovisning	507
29.2.2	Granskningssynpunkter	508
29.3	Nyvännen kunskap sedan Fud-program 2010	509
29.3.1	Fyra forskningsområden och arton projekt	509
29.3.2	Socioekonomisk påverkan – samhällsekonomiska effekter	510
29.3.3	Beslutsprocesser	510
29.3.4	Opinion och attityder – psykosociala effekter	512
29.3.5	Omvärldsförändringar	512
29.4	Kommentarer och utvärdering	514
29.4.1	Beredningsgruppens kommentarer	514
29.4.2	Fristående utvärdering	517
29.5	SKB:s syn på behovet av fortsatt samhällsforskning kring slutförvarsfrågorna	519
30	Informationsbevarande över generationer	521
30.1	Slutsatser i granskningen av Fud-program 2010	521
30.2	Bakgrund och tidigare arbete	521
30.3	Former för överföring av information	521
30.4	Pågående arbete	522
Referenser		525
Bilaga Förkortningar		555

Del I

SKB:s verksamhet och handlingsplan

- 1 Hantering av radioaktivt avfall och använt kärnbränsle
- 2 Handlingsplan
- 3 Flexibilitet vid ändrade förutsättningar

1 Hantering av radioaktivt avfall och använt kärnbränsle

Den svenska kraftindustrin har under drygt 40 år producerat elektricitet med kärnkraft. Under denna tid har en stor del av det hanteringssystem som behövs för att på ett säkert sätt ta hand om avfallet från driften av reaktorerna byggts upp. Systemet består av Centralt mellanlager för använt kärnbränsle (Clab), Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall (SFR) samt fartyget m/s Sigrid och behållare för transporterna.

För omhändertagandet av det använda kärnbränslet återstår att bygga och driftsätta det system av anläggningar, KBS-3-systemet, som behövs för slutförvaring. I detta ingår att bygga en anläggningsdel för inkapsling av det använda kärnbränslet i anslutning till Clab, att anskaffa behållare för transporter av kapslar med använt kärnbränsle och att bygga en slutförvarsanläggning där kapslarna ska deponeras. Förutom dessa anläggningar planerar SKB att bygga en kapselfabrik.

För det låg- och medelaktiva avfallet kommer det att behövas en utbyggnad av SFR, ytterligare ett slutförvar – Slutförvaret för långlivat avfall (SFL) och behållare för transporter av långlivat avfall.

Vidare måste befintliga system och anläggningar (Clab, SFR och transportsystemet) löpande underhållas och moderniseras bland annat med tanke på förlängda planerade drifttider för de svenska reaktorerna och därmed för kärnavfallssystemet.

SKB:s handlingsplan beskriver de övergripande planerna för att realisera de återstående delarna av avfallssystemet på ett sådant sätt att människa och miljö skyddas – i dag och i framtiden.

1.1 Förutsättningar

1.1.1 Gällande regelverk och SKB:s uppdrag

Enligt lagen (1984:3) om kärnteknisk verksamhet (kärntekniklagen eller kort KTL) ska den som har tillstånd till kärnteknisk verksamhet svara för att på ett säkert sätt hantera och slutförvara radioaktivt avfall och använt kärnbränsle som uppkommer i verksamheten. Tillståndshavarna är också skyldiga att på ett säkert sätt avveckla sina anläggningar där verksamhet inte längre ska bedrivas. Tillståndshavare för kärnkraftverken i Forsmark, Oskarshamn, Ringhals och Barsebäck är Forsmarks Kraftgrupp AB, OKG Aktiebolag, Ringhals AB och Barsebäck Kraft AB. Dessa företag benämns nedan kärnkraftsföretagen.

På uppdrag av sina ägare svarar Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, för hanteringen av det radioaktiva avfallet och det använda bränslet från de svenska kärnkraftverken. SKB:s ansvar börjar när avfallet lämnar kärnkraftverken. För detta ändamål äger och driver SKB ett transportsystem och anläggningar för avfallshantering, se avsnitt 1.5. SKB ägs av Vattenfall AB, OKG Aktiebolag, Forsmarks Kraftgrupp AB och E.ON Kärnkraft Sverige AB.

Kärnkraftsföretagen har ansvaret för att avveckla och riva sina kärnkraftverk. SKB har i detta sammanhang fått i uppdrag av kärnkraftsföretagen att delta i planeringen och genomförandet av kommande nedmontering och rivning. SKB:s medverkan avser i huvudsak samordning av generella metoder och rutiner inklusive beräkning av volymer, radionuklidinventarium och kostnader avseende nedmontering och rivning.

Enligt kärntekniklagen ska kärnkraftsföretagen i samråd utarbeta ett program för den forsknings- och utvecklingsverksamhet och de övriga åtgärder som behövs för att på ett säkert sätt hantera och slutförvara kärnavfallet och det använda kärnbränslet samt för att avveckla kärnkraftverken. Ett sådant program (Fud-program) ska vart tredje år lämnas till Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM). Programmen granskas och utvärderas av SSM efter en omfattande remissbehandling. De granskas även av Kärnavfallsrådet. SSM och Kärnavfallsrådet lämnar synpunkter till regeringen, som får ställa villkor för den fortsatta forsknings- och utvecklingsverksamheten.

Det är SKB som på uppdrag av kärnkraftsföretagen och i samarbete med dessa utarbetar Fud-programmen och ger in dem till SSM, se avsnitt 1.2.

Kärnkraftsföretagen är enligt kärntekniklagen skyldiga att svara för kostnaderna för de åtgärder som behövs för att omhänderta kärnavfallet och det använda kärnbränslet samt för att avveckla anläggningarna. Enligt lagen (2006:647) om finansiella åtgärder för hanteringen av restprodukter från kärnteknisk verksamhet (finansieringslagen) är kärnkraftsföretagen skyldiga att betala en avgift för bland annat den framtida avfallshanteringen och avvecklingen. På uppdrag av kärnkraftsföretagen upprättar SKB i enlighet med finansieringslagen en kostnadsberäkning vart tredje år, se avsnitt 1.4. Inbetalda medel förvaltas av statliga Kärnavfallsfonden.

Förutom det radioaktiva avfall som SKB tar emot från kärnkraftsföretagen tar SKB också emot visst radioaktivt avfall från andra företag. Detta regleras genom kommersiella avtal mellan SKB och respektive företag.

1.1.2 Grundläggande principer

Hanteringen av radioaktiva ämnen är reglerad i lagar och förordningar. Inriktningen för arbetet har dessutom fastställts genom en lång rad politiska beslut och uttalanden som kan sammanfattas i följande punkter:

- Kärnbränslet från de svenska reaktorerna ska slutförvaras inom Sveriges gränser med berörda kommuners medgivande.
- Sverige ska inte slutförvara avfall från andra länder.
- Det använda kärnbränslet ska inte upparbetas.
- Slutförvaret ska etableras av de generationer som dragit nytta av den svenska kärnkraften.

SKB planerar för geologisk slutförvaring av kärnavfallet och det använda kärnbränslet. Geologisk slutförvaring diskuterades redan på 1950-talet. Andra mer eller mindre orealistiska strategier som att till exempel skjuta upp det använda kärnbränslet i rymden, deponera det i världshavens djuphavsbottnar eller begrava det i inlandsisen har också studerats. Flertalet länder och organisationer som IAEA och OECD/NEA är i dag överens om att geologisk deponering är en lösning som uppfyller alla krav på säker slutförvaring och genomförbarhet. Vidare stöds geologisk deponering i EU:s avfallsdirektiv.

Nedanstående principer ligger till grund för utformningen av SKB:s slutförvar:

- Förvaren ska förläggas till en långsiktigt stabil geologisk miljö.
- Förvaren ska förläggas i berggrund som kan antas vara ekonomiskt ointressant för framtida generationer.
- Förvarens säkerhet ska baseras på flera barriärer.
- Tekniska barriärer ska i första hand bestå av naturligt förekommande material som är långsiktigt stabila i förvarsmiljön.
- Barriärerna ska fungera passivt, det vill säga utan ingripande av människan och utan tillförsel av energi eller material.
- Förvaren ska utformas på ett sådant sätt att de inte behöver övervakas efter förslutning.

Flerbarriärprincipen är en grundläggande och internationellt vedertagen säkerhetsprincip för slutförvaring. Den innebär att ett slutförvars säkerhet efter förslutning ska baseras på flera barriärer som har till uppgift att innesluta, förhindra eller fördröja spridningen av de radioaktiva ämnena i avfallet. Vilka barriärer eller barriärfunktioner som behövs i ett slutförvar beror till stor del på innehållet av radioaktiva ämnen och deras halveringstider. Kraven på barriärerna i Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall är lägre än de för förvaret för använt kärnbränsle respektive långlivat radioaktivt avfall.

Ovanstående principer tillsammans med en rad andra överväganden, som till exempel att förvaret rent tekniskt ska vara möjligt att konstruera, har lett till att SKB valt KBS-3-metoden för slutförvaring av använt kärnbränsle. I en utvärdering av olika strategier och system för att ta hand om

använt kärnbränsle (SKB 2010a) redovisar SKB bakgrund och motiv till valet av KBS-3-metoden. Utvärderingen gjordes mot uppställda krav, såväl övergripande och samhällliga krav som miljö-, säkerhets- och strålskyddskrav.

En av förutsättningarna för att kunna bygga nya anläggningar är att de överensstämmer med konstruktionsförutsättningarna och uppfyller de krav som SKB, myndigheterna och andra intressenter ställer. För att säkerställa detta tillämpar SKB en systematisk kravhantering (Morén och Wikström 2007).

1.1.3 KBS-3-metoden

SKB:s metod för slutförvaring av använt kärnbränsle kallas KBS-3-metoden, eftersom den bygger på den tredje rapporten i projektet KärnbränsleSäkerhet. Utvecklingen av metoden påbörjades under slutet av 1970-talet och har i dag nått så långt att arbetet främst är inriktat på att anpassa de tekniska lösningarna till en industrialiserad process. Det som kännetecknar KBS-3-metoden är att:

- det använda kärnbränslet kapslas in i täta, lastbärande kapslar som är motståndskraftiga mot korrosion,
- kapslarna deponeras i kristallint berg på 400–700 meters djup,
- kapslarna omges av en buffert som förhindrar vattenflöde och skyddar dem,
- de utrymmen i berget som krävs för deponering återfylls och försluts.

Internationellt är KBS-3-metoden den metod för slutförvaring av använt kärnbränsle som kommit längst i utvecklingen.

I mars 2011 lämnade SKB in en ansökan enligt kärntekniklagen (SKB 2011a) för slutförvaring av använt kärnbränsle och en ansökan enligt miljöbalken för KBS-3-systemet (SKB 2011b). En ansökan enligt kärntekniklagen för inkapslingsanläggningen lämnades in 2006 och kompletterades först 2009 och därefter i samband med ansökningarna i mars 2011 (SKB 2011c).

Även Finland har valt att utforma sitt slutförvar enligt KBS-3-metoden. År 2000 tog Finlands riksdag beslut om metod och plats för det finska slutförvaret. SKB:s systerorganisation Posiva Oy lämnade i slutet av 2012 in en ansökan om tillstånd för uppförande av en inkapslings- och slutförvaringsanläggning för använt kärnbränsle enligt KBS-3-metoden. Anläggningen ska enligt planerna uppföras på Olkiluoto i Euraåminne. Under 2013 inledde SKB och Posiva planering av ett fördjupat samarbete där målet är att utveckla gemensamma tekniska lösningar för slutförvarssystemet inför driftsättningen.

KBS-3-metoden övervägs som slutförvaringsmetod i flera andra länder, bland andra Kanada, Sydkorea, Storbritannien och Tjeckien.

1.1.4 Det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet

Planeringen för omhändertagandet av det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet styrs till stor del av avfallens egenskaper. Avfallet delas in i kategorier efter graden av radioaktivitet (låg-, medel- eller högaktivt) samt efter aktivitetens livslängd (kort- eller långlivat avfall). Graden av radioaktivitet styr hur avfallet hanteras. Det medelaktiva avfallet och det högaktiva använda kärnbränslet kräver en strålskärmad hantering medan det lågaktiva avfallet kan hanteras utan strålskärmning. Hur slutförvaringen ska utformas styrs till stor del av om avfallet är kortlivat eller långlivat.

Hur stor mängd avfall som uppkommer och när avfallet uppkommer är också viktiga utgångspunkter för planeringen av avfallssystemet. Planeringen är baserad på avfallet från det nuvarande kärnkraftsprogrammet. Avfallsmängderna är beroende av reaktorernas drifttid samt tillgänglighet och andra driftförhållanden. Uppskattade mängder radioaktivt avfall och använt kärnbränsle baseras på respektive kärnkraftsföretags prognoser. Antagandena om reaktorernas framtida drift påverkar direkt kapaciteten och drifttiden för SKB:s olika anläggningar. Den långsiktiga planeringen för avfallssystemet baseras på kärnkraftsföretagens aktuella planeringsförutsättningar. Detta innebär att reaktorerna i Forsmark och Oskarshamn drivs i 60 år. För Ringhals är planeringen att reaktor 1 och 2 drivs i 50 år medan reaktor 3 och 4 drivs i 60 år. Under 2013 fattades beslut om att utöka

den planerade drifttiden för reaktorerna i Forsmark samt Ringhals 3 och 4 från 50 till 60 års drift. De mängder som detta scenario ger upphov till redovisas nedan. Inverkan av andra antaganden för kärnkraftsprogrammet diskuteras i kapitel 3.

Låg- och medelaktivt avfall

Det låg- och medelaktiva avfallet indelas i kortlivat och långlivat avfall. Kortlivat avfall innehåller en signifikant mängd radionuklider med en halveringstid på maximalt 31¹ år och endast en begränsad mängd radionuklider med längre halveringstid. Långlivat avfall innehåller signifikanta mängder av radionuklider med långa halveringstider.

Låg- och medelaktivt avfall uppkommer både under drift och vid nedmontering och rivning av kärntekniska anläggningar. Driftavfallet består till exempel av förbrukade filter, utbytta komponenter och använda skyddskläder. Avfallet från nedmontering och rivning består bland annat av metallskrot och byggnadsmaterial.

Kortlivat avfall deponeras i dag i SFR eller i markförvar. Markförvaren, där avfall med mycket låg aktivitet deponeras, drivs i avfallsproducenternas regi medan SFR drivs av SKB. Enligt nuvarande prognoser kommer SKB att slutförvara totalt cirka 170 000 kubikmeter kortlivat avfall samt avsätta plats för nio reaktortankar. Huvuddelen av det kortlivade avfallet kommer från kärnkraftverken. Övrigt avfall kommer från Clab och Clink (Central anläggning för hantering, mellanlagring och inkapsling av använt kärnbränsle) samt från anläggningar som tillhör Studsvik Nuclear AB och AB SVAFO.

Det långlivade avfallet från kärnkraftverken består av förbrukade hårdkomponenter, reaktortankar från tryckvattenreaktorer och styrvastavar från kokvattenreaktorer. De långlivade radionukliderna bildas av stabila grundämnen i till exempel stål när dessa utsätts för stark neutronstrålning från reaktorhärden. Den totala mängden långlivat avfall uppskattas till cirka 16 000 kubikmeter, varav cirka en tredjedel kommer från kärnkraftverken. Resten kommer från anläggningar som tillhör Studsvik Nuclear AB och SVAFO. SKB planerar att slutförvara det långlivade avfallet i SFL.

Angivna volymer inkluderar ett påslag för osäkerheter i avfallsprognoserna.

Använt kärnbränsle

Det använda kärnbränslet är långlivat. Det utgör en mindre del av den totala mängden avfall som ska slutförvaras. Bränslet innehåller den helt dominerande mängden av all radioaktivitet, både kort- och långlivad. Använt kärnbränsle är högaktivt och kräver strålskärning vid all hantering, lagring och slutförvaring. Slutförvaringen planeras ske i Kärnbränsleförvaret.

Det använda bränslet alstrar värme även efter att det tagits ur reaktorn (resteffekt). Resteffekten gör att bränslet kräver kylning för att inte överhettas. Resteffektens storlek beror på hur länge bränslet avklingat och på dess utbränning, det vill säga den energimängd som utvunnits ur bränslet. Utbränningen anges i megawattdygn per kilo uran (MWD/kgU). I och med den tekniska utvecklingen och förändringar i driften av reaktorerna har utbränningen av bränslet ökat successivt sedan reaktorerna togs i drift. Motivet till dessa förändringar är att få ett så effektivt utnyttjande av bränslet som möjligt. Kärnkraftsföretagen har i dag planer på att öka utbränningen ytterligare. I planeringen är det viktigt att klargöra konsekvenserna av en högre utbränning för KBS-3-systemets alla delar.

Enligt planeringsförutsättningarna kommer den totala mängd använt kärnbränsle som ska slutförvaras att omfatta cirka 6 300 kapslar. En kapsel innehåller cirka två ton bränsle. Mängden använt kärnbränsle anges som den mängd uran som ursprungligen fanns i bränslet.

I den mängd använt kärnbränsle som ska deponeras i Kärnbränsleförvaret ingår, förutom allt använt bränsle från dagens svenska kärnkraftverk, även bränsle från Ågestareaktorn, bränslerester från

¹ Kortlivat avfall definieras enligt IAEA:s ”Radioactive Waste Management Glossary, 2003 Edition” som avfall som inte innehåller signifikanta nivåer radionuklider med halveringstider längre än 30 år. SKB använder samma definition men med 31 år för att inkludera cesium-137, vilken används som nyckelnuklid för att uppskatta innehåll av andra radionuklider.

provningsprogram i Studsvik samt så kallat Mox-bränsle (Mixed Oxide Fuel). Dessa bränsletyper utgör en mycket liten del av den totala mängden. Cirka 20 ton använt kärnbränsle från Ågesta samt cirka två ton använt kärnbränsle från Studsvik Nuclear AB:s undersökningsverksamhet mellanlagras i dag i Clab.

I Clab lagras även 23 ton Mox-bränsle som har erhållits från Tyskland i utbyte mot det bränsle som i ett tidigt skede sändes till Frankrike (La Hague) för upparbetning. Vid upparbetning separeras uran, plutonium och avfallsprodukter. Sverige har även skickat använt bränsle för upparbetning till Sellafield i England. Det uran och plutonium som härrör från denna upparbetning ska enligt planeringen användas för att tillverka åttio Mox-bränsleelement (cirka 14 ton) för Oskarshamns kärnkraftverk.

1.2 Program för forskning, utveckling och demonstration

Kärntekniklagen (KTL) reglerar Fud-programmets periodicitet och omfattning. Programmet ska dels innehålla en översikt över samtliga åtgärder som behövs för att ta hand om det radioaktiva avfallet, dels närmare redovisa de åtgärder som avses vidtas inom en tidsrymd om minst sex år. Programmet ska lämnas in vart tredje år till SSM, som gör en granskning och utvärdering avseende planerad forsknings- och utvecklingsverksamhet, redovisade forskningsresultat, alternativa hantlings- och förvaringsmetoder samt planerade åtgärder. Efter en omfattande remissbehandling överlämnar SSM ärendet till regeringen som tar ställning till om programmet uppfyller de krav som ställs i kärntekniklagen och om eventuella riktlinjer avseende den fortsatta verksamheten. Även Kärnavfallsrådet, som är en oberoende tvärvetenskaplig kommitté och rådgivande till regeringen, lämnar sin självständiga bedömning av programmet.

Utvecklingen av KBS-3-metoden för slutförvaring av använt kärnbränsle har pågått sedan slutet av 1970-talet. Metoden redovisades 1983 i en rapport som utgjorde underlag för ansökningarna om att ta de senast byggda kärnkraftsreaktorerna i drift. Då den nya kärntekniklagen trätt i kraft i februari 1984 kompletterades ansökningarna med SKB:s första program, FoU-program 84, som därmed också blev ett ansökansunderlag. Regeringen gav i juni 1984 kärnkraftsföretagen laddningstillstånd för reaktorerna Forsmark 3 och Oskarshamn 3. I beslutet skrev regeringen att KBS-3-metoden ”i sin helhet i allt väsentligt befunnits kunna godtas med hänsyn till säkerhet och strålskydd”. KBS-3-metoden har sedan dess legat till grund som planeringsförutsättning för SKB:s program för forskning, utveckling och demonstration. Parallellt har SKB följt utvecklingen av andra metoder och vid ett antal tillfällen utvärderat dessa i förhållande till KBS-3-metoden.

Fud-programmets fokus har varierat genom åren, beroende på var tyngdpunkten i SKB:s verksamhet har legat. I föregående program, Fud-program 2010, redovisades en kort sammanfattning av de Fud-program som SKB har presenterat fram till och med år 2007. Samtliga inlämnade program har remissbehandlats och därefter godtagits av regeringen, i några fall med krav på kompletterande redovisning eller anvisningar om hur SKB ska beakta framförda remissynpunkter. I figur 1-1 ges en översikt av presenterade forsknings- och utvecklingsprogram och andra milstolpar i utvecklingsarbetet.

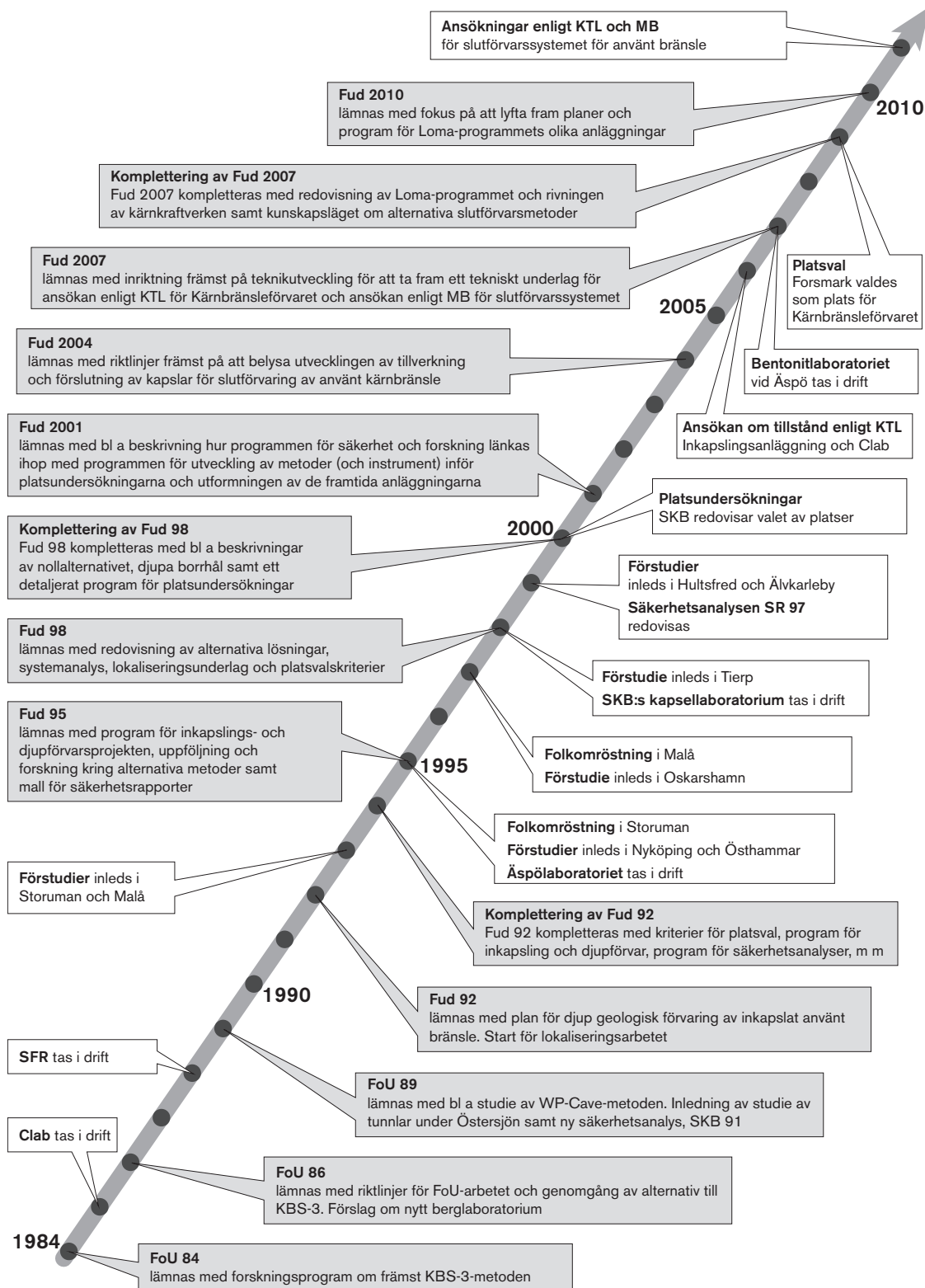
Fud-program 2010

Redovisningen i Fud-program 2010 delades in i fem delar: övergripande handlingsplan, Loma-programmet, Kärnbränsleprogrammet, forskning för analys av långsiktig säkerhet samt samhällsvetenskaplig forskning. I den första delen gavs en översiktlig bild av SKB:s planering för att uppföra och ta i drift nya anläggningar och anläggningsdelar vid befintliga anläggningar. I den övergripande handlingsplanen redogjordes också för de båda programmets flexibilitet och begränsningar vid ett antal specifika ändringar av förutsättningarna.

I Fud-program 2010 utvecklades framför allt planerna för att genomföra Loma-programmet (programmet för omhändertagande av låg- och medelaktivt avfall). Här redogjordes för planerna för en etappvis utbyggnad av SFR. Förutom slutförvaring av kortlivat avfall planeras utbyggnaden också att kunna användas för mellanlagring av långlivat avfall. Planerna för SFL redovisades med fokus på den närmaste tidens forsknings- och utvecklingsarbete.

Teknikutvecklingen inom Kärnbränsleprogrammet går nu från principlösningar till lösningar som är anpassade till en industrialiserad process. Planeringen för detta redovisades för de produktionslinjer som definierades i Fud-program 2007 och som beskriver produktionsflödet för förvarets delar.

SKB:s forskning som stöder analyserna av den långsiktiga säkerheten för Kärnbränsleförvaret samt det utbyggda SFR beskrivs. Mycket av denna forskning kommer också att vara relevant för säkerhetsanalysen för SFL.



Figur 1-1. Milstolpar i SKB:s utvecklingsprogram.

SSM framförde framför allt i sin granskning att SKB bör redovisa planer och strategier avseende avveckling av kärnkraftverken samt Ågesta kraftvärmeverk mer utförligt. Vidare bedömer SSM att SKB bör fördjupa redovisningen av programmet för långlivat låg- och medelaktivt avfall med hänsyn till olika handlingsalternativ för hantering och slutförvaring av avfallet.

1.3 Fud-programmen i relation till andra redovisningar till SSM

Utöver Fud-programmen lämnar SKB och kärnkraftsföretagen även in andra redovisningar till SSM där man redogör för sina planer avseende hantering av radioaktivt avfall och använt kärnbränsle. För att undvika dubbel redovisning görs i föreliggande Fud-program hänvisningar till dessa redovisningar. De viktigaste av dessa redovisningar är:

- de ansökningar som SKB har lämnat in för Kärnbränsleförvaret och inkapslingsanläggningen samt kompletteringar till dessa,
- kommande ansökningar för utbyggnad av SFR,
- studier och planer för avveckling av kärnkraftsreaktorerna och andra kärntekniska anläggningar,
- återkommande helhetsbedömningar inkluderande säkerhetsredovisningar (SAR) för SKB:s driftsatta anläggningar Clab och SFR,
- de regelbundna planrapporterna.

Ansökningarna enligt kärntekniklagen för slutförvaring av använt kärnbränsle (SKB 2011a) och enligt miljöbalken för KBS-3-systemet lämnades in i mars 2011 (SKB 2011b). Här redovisas den verksamhet som ska leda fram till bygge, drift och slutlig deponering samt en redovisning av säkerheten under drift och efter slutlig förslutning. En ansökan enligt kärntekniklagen för inkapslingsanläggningen lämnades in 2006. Den kompletterades 2009 avseende en sammanslagning av inkapslingsanläggningen med Clab till en integrerad anläggning, Clink. I mars 2011 gjordes ytterligare en komplettering med de delar av ansökningarna som berör KBS-3-systemet (SKB 2011c). I sitt arbete med granskning av dessa ansökningar begär SSM in kompletteringar som SKB besvarar.

För att slutförvara det avfall som uppkommer vid nedmontering och rivning av kärnkraftsreaktorer, i detta läge de avställda reaktorerna i Barsebäck och i Ågesta samt forskningsreaktorerna i Studsvik, behövs en utbyggnad av SFR. SKB planerar att under våren 2014 lämna in ansökningar för att bygga ut SFR.

För de anläggningar som är i drift, Clab och SFR, har SKB i egenskap av tillståndshavare skyldighet att lämna diverse redovisningar till SSM som inte redogörs för i detta Fud-program. Enligt kärntekniklagen ska det minst vart tionde år göras en helhetsbedömning av säkerhet och strålskydd. I samband med detta redovisas också vilka förändringar man då ser framför sig. Bedömningen ska göras med hänsyn till utvecklingen inom teknik och vetenskap. Den ska vidare omfatta analyser och redogörelser av förutsättningarna för att föreskrifter och villkor ska kunna uppfyllas fram till nästa säkerhetsbedömning. För de driftsatta anläggningarna finns inom ramen för detta också en säkerhetsredovisning (SAR) som ska hållas ständigt aktuell. En avvecklingsplan ska tas fram samtidigt med redovisningen av den återkommande helhetsbedömningen. Planen ska hållas aktuell tills anläggningen är avvecklad och principiella förändringar i planen ska anmälas till SSM.

Efter olyckan i Fukushima i Japan våren 2011 kom EU:s ministerråd överens om att alla EU-länder skulle stresstesta sina kärnkraftverk. Syftet med dessa tester var att bedöma hur anläggningen klarar av extremt osannolika händelser. Det var kärnkraftsindustrin som genomförde stresstesterna, medan SSM granskade dess analyser och sammanställde en nationell rapport som sedan granskades av internationella experter. De nationella rapporterna har därefter följts av nationella handlingsplaner. Regeringen beslutade att även Clab skulle genomgå ett stresstest. Resultaten från stresstestet och handlingsplaner med anledning av dessa resultat redovisades i en rapport som lämnades till SSM år 2011.

En annan redovisning som kopplar till Fud-programmet är planrapporten, se avsnitt 1.4. Här redovisas den beräknade framtida kostnaden för att ta hand om det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet samt att avveckla kärnkraftsreaktorerna. Kostnadsredovisningen baseras på de planer som redovisas i Fud-programmet.

1.4 Finansiering

Kostnaderna för att ta hand om driftavfallet betalas löpande, medan finansieringen av kärnavfallsprogrammet i övrigt bygger på att medel samlas i en särskild fond, Kärnavfallsfonden. Det senare regleras i finansieringslagen och finansieringsförordningen.

Vart tredje år upprättar SKB en kostnadsberäkning – planrapport, på uppdrag av kärnkraftsföretagen. Redovisningen lämnas in till SSM som granskar SKB:s beräkning och lämnar förslag på avgifter och säkerheter. Avgifterna och säkerheternas storlek beslutas av regeringen (med undantag av den säkerhet som ställs för Barsebäck, som beslutas av SSM). Kärnkraftsföretagen betalar in medlen till Kärnavfallsfonden och dessa medel får, enligt regeringens föreskrifter, placeras på räntebärande konto i Riksgäldskontoret, i skuldförbindelser utfärdade av staten och säkerställda bostadsobligationer.

Vid årsskiftet 2012/2013 fanns cirka 49 miljarder kronor i kärnkraftsföretagens andelar av Kärnavfallsfonden (marknadsvärdet). Därutöver har cirka 34 miljarder kronor (i dagens prisnivå) använts för uppbyggnad och drift av dagens system och för forsknings- och utvecklingsarbetet. Under åren 2012 till 2014 är den genomsnittliga avgiften 2,2 öre per producerad kilowattimme el för de kärnkraftverk som är i drift. Barsebäck Kraft AB betalar en årlig avgift på 842 miljoner kronor.

Förutom att betala avgifter, ställer kärnkraftsföretagens moderbolag säkerheter för att täcka de avgifter som ännu inte är betalda. För de reaktorer som är i drift ställs även en säkerhet för det fall att fonden inte skulle komma att räcka på grund av oplanerade händelser.

1.5 Beskrivning av avfallssystemet

Figur 1-2 ger en översikt av system för att ta hand om Sveriges radioaktiva avfall och använda kärnbränsle. Bilden visar flödet från avfallsproducenterna via mellanlager och behandlingsanläggningar till olika typer av slutförvar. Heldragna linjer representerar transportflöden till befintliga eller planerade anläggningar. Streckade linjer representerar alternativa hanteringsvägar.

Sveriges avfallssystem kan delas in i två huvuddelar: systemet för omhändertagande av låg- och medelaktivt avfall samt systemet för omhändertagande av det använda kärnbränslet (KBS-3-systemet). Anläggningarna inom det förra drivs i både SKB:s och i avfallsproducenternas regi. Samtliga anläggningar inom KBS-3-systemet kommer att drivas av SKB.

SKB svarar för transportsystemet, som är gemensamt för det låg- och medelaktiva avfallet och det använda kärnbränslet. Transporterna sker till sjöss, eftersom samtliga kärnkraftverk och kärnavfallsanläggningar ligger vid kusten. Transportsystemet består av ett specialbyggt fartyg, olika typer av transportbehållare beroende på avfallstyp samt specialfordon för lastning och lossning.

Ett nytt fartyg, m/s Sigrid, har sjösatts. Hon ersätter m/s Sigyn som byggdes 1982. Det nya fartyget har, liksom det gamla, dubbla botten och dubbel bordläggning. Konstruktionen skyddar lasten vid en eventuell grundstötning eller kollision. Sigrid är mer bränslesnål och ger en lägre miljöpåverkan än sin föregångare. Hon rymmer tolv bränsle- och avfallsbehållare i stället för tidigare tio. Normalt gör fartyget, som drivs på entreprenad, mellan 30 och 40 resor per år mellan kärnkraftverken, Studsvik, SFR och Clab.

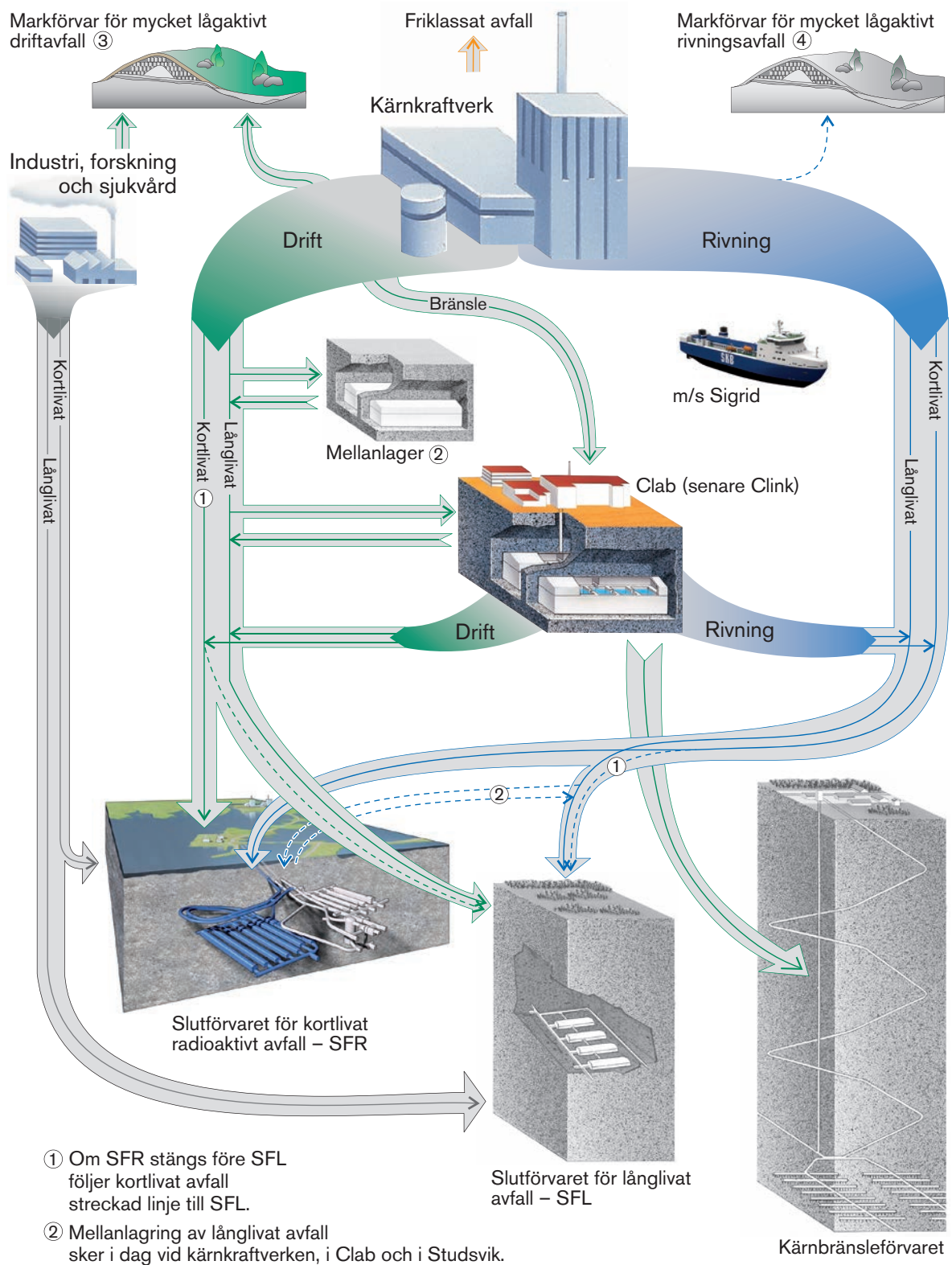
Anläggningarna inom de båda systemen samt SKB:s anläggningar för forskning, utveckling och demonstration beskrivs i de nästföljande avsnitten.

1.5.1 Anläggningar inom systemet för låg- och medelaktivt avfall

För att på ett säkert sätt ta hand om låg- och medelaktivt avfall behövs anläggningar för mellanlagring, behandling och slutförvaring samt ett system för transporter. Inom systemet omhändertas både kortlivat och långlivat avfall.

SKB:s slutförvar för kortlivat radioaktivt avfall, SFR, har varit i drift sedan 1988. Kärnkraftsföretagen, SVAFO och Studsvik Nuclear AB driver lokala behandlingsanläggningar, mellanlager och markförvar för kortlivat avfall.

I dag mellanlagras långlivat driftavfall vid kärnkraftverken, i Clab och i SVAFO:s mellanlager i Studsvik. SKB planerar för att slutförvara det långlivade låg- och medelaktiva avfallet i SFL (Slutförvaret för långlivat avfall).



- ① Om SFR stängs före SFL följer kortlivat avfall streckad linje till SFL.
- ② Mellanlagring av långlivat avfall sker i dag vid kärnkraftverken, i Clab och i Studsvik. Mellanlagring av långlivat avfall kan även komma att ske i SFR.
- ③ Markförvar finns vid kärnkraftverken i Forsmark, Oskarshamn och Ringhals. Liknande markförvar finns även i Studsvik, dit en del avfall från industri, forskning och sjukvård går.
- ④ Möjligt alternativ för mycket lågaktivt rivningsavfall. Beslut om markförvar är ännu ej fattat.

Figur 1-2. Systemet för att ta hand om Sveriges radioaktiva avfall och använda kärnbränsle. Heldragna linjer representerar transportflöden till befintliga eller planerade anläggningar. Streckade linjer representerar alternativa hanteringsvägar.

Anläggningar för behandling av avfall

Vid kärnkraftverken och i Studsvik finns behandlingsanläggningar för låg- och medelaktivt avfall. Här behandlas och förpackas avfallet så att det uppfyller de krav som ställs för deponering i SFR eller i markförvar. Syftet med behandlingen kan vara att friklassa material, reducera volymen, koncentrera aktiviteten eller solidifiera material.

Markförvar

Markförvar används för att slutförvara avfall med mycket låg aktivitet. I dag finns markförvar på industriområdena vid kärnkraftverken Forsmark, Oskarshamn och Ringhals samt i Studsvik. SKB undersöker möjligheten att bygga ett markförvar för mycket lågaktivt avfall från nedmontering och rivning av kärnkraftverken. Efter cirka 50 år har radioaktiviteten i detta avfall sjunkit till så låga nivåer att det kan friklassas ur strålskyddssynpunkt.

Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall, SFR

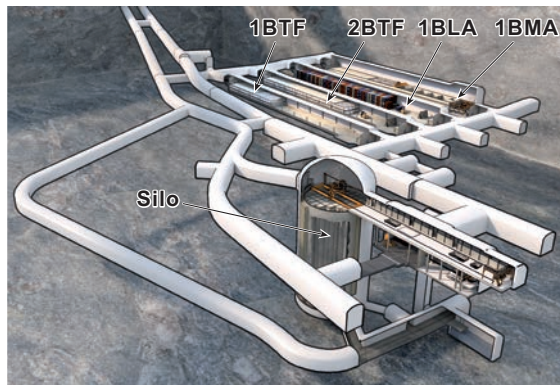
SFR är lokaliserat vid Forsmarks kärnkraftverk, se figur 1-3. Förvaret är placerat under Östersjön med cirka 60 meter bergtäckning. Från hamnen i Forsmark leder två, en kilometer långa, tillfartstunnlar till förvarsområdet.

Förvarsutrymmena utgörs i dag av fyra 160 meter långa bergssalar i olika utförande och ett 70 meter högt förvarsutrymme där en betongsilo byggts. Anläggningens totala lagringskapacitet är 63 000 kubikmeter. I en av de fyra bergssalarna förvaras lågaktivt avfall (1BLA). I två av bergssalarna förvaras medelaktivt avfall med lägre aktivitetsnivåer (1-2BTF). Det medelaktiva avfallet med mest aktivitet placeras i den fjärde bergssalen (1BMA) eller i betongsilon. Silon kommer att innehålla huvuddelen av de radioaktiva ämnena i SFR. Avfallet i BLA och 1-2BTF hanteras utan strålskärning.

Avfallet i SFR kommer från kärnkraftverken, Clab, Studsvik och Ågesta. Vid årsskiftet 2012/2013 hade 34 822 kubikmeter avfall deponerats. I dag slutförvaras endast driftavfall i SFR. För att kunna slutförvara allt tillkommande kortlivat driftavfall samt avfall från nedmontering och rivning planerar SKB att bygga ut SFR.



Vy över ovanmarksdelen



SFR under mark



Bergssal för medelaktivt avfall



Vy över silotopp

Figur 1-3. Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall, SFR.

Mellanlager för långlivat avfall

I dag mellanlagras den största delen av det långlivade avfallet, främst förbrukade hårdkomponenter, i förvaringsbassänger på kraftverken och i Clab. Därutöver använder OKG Aktiebolag ett bergrum på Simpevarpshalvön (BFA) för torr mellanlagring av driftavfall. Drifttillståndet innehas av OKG Aktiebolag, men BFA är godkänt för mellanlagring av hårdkomponenter från alla svenska kärnkraftverk. Även Forsmarks Kraftgrupp AB och Ringhals AB har anläggningar för torr mellanlagring på sina kraftverksområden.

SKB planerar för att kunna mellanlagra långlivat avfall i det utbyggda SFR eller på annan plats och utreder därför möjligheterna för detta.

Barsebäck Kraft AB planerar att inom sitt driftområde uppföra en ny byggnad för torr lagring av segmenterade bestrålade interndelar från reaktortankarna. De interndelar som klassas som kortlivat avfall och som ska slutförvaras i SFR flyttas dit då utbyggnaden är driftsatt. De interndelar som utgör långlivat avfall kommer att flyttas från Barsebäck för mellanlagring i SFR eller annan förberedd plats.

Förutom avfall från kärnkraftverken finns det långlivat avfall som härrör från forskning. Detta avfall tillhör SVAFO och Studsvik Nuclear AB och mellanlagras i dag i Studsvik.

Slutförvaret för långlivat avfall, SFL

SKB planerar att slutförvara det långlivade avfallet på ett relativt stort djup i en anläggning med bergssalar anpassade för de olika avfallstyperna. Detta slutförvar (SFL) kommer att vara den anläggning som tas sist i drift. Ett arbete med att ta fram möjliga förvarskoncept pågår och lokaliseringen av förvaret är i dag en öppen fråga.

SFL:s förvarsvolym kommer att vara relativt liten i jämförelse med SKB:s övriga slutförvar. Den totala lagringsvolymen uppskattas till 16 000 kubikmeter.

Transportsystem för låg- och medelaktivt avfall

Transportsystemet för låg- och medelaktivt avfall består av fartyget m/s Sigrid, specialfordon och olika typer av transportbehållare. Fartyget och fordonen används också för transporter av använt kärnbränsle inom KBS-3-systemet.

Kortlivat avfall transporteras i dag från kärnkraftverken och Clab till SFR. Lågaktivt avfall behöver ingen strålskärning och kan därför transporteras i ISO-containrar. Medelaktivt avfall kräver däremot strålskärning och merparten gjuts in i betong eller bitumen vid kärnkraftverken. Avfallet transporteras i transportbehållare (ATB) med 7–20 centimeter tjocka väggar av stål, beroende på hur radioaktivt det är, se figur 1-4.

I dag transporteras långlivat avfall från kärnkraftverken till Clab. Avfallet består av styrestavar från kokvattenreaktorer och utbytta hårdkomponenter. Avfallet transporteras i en transportbehållare (TK) med cirka 30 centimeter tjocka väggar av stål, se figur 1-4. En ny avfallstransportbehållare (ATB 1T) håller på att tas fram för att kunna transportera långlivat avfall i så kallade ståltankar avsedda för torr mellanlagring.

1.5.2 Anläggningar inom KBS-3-systemet

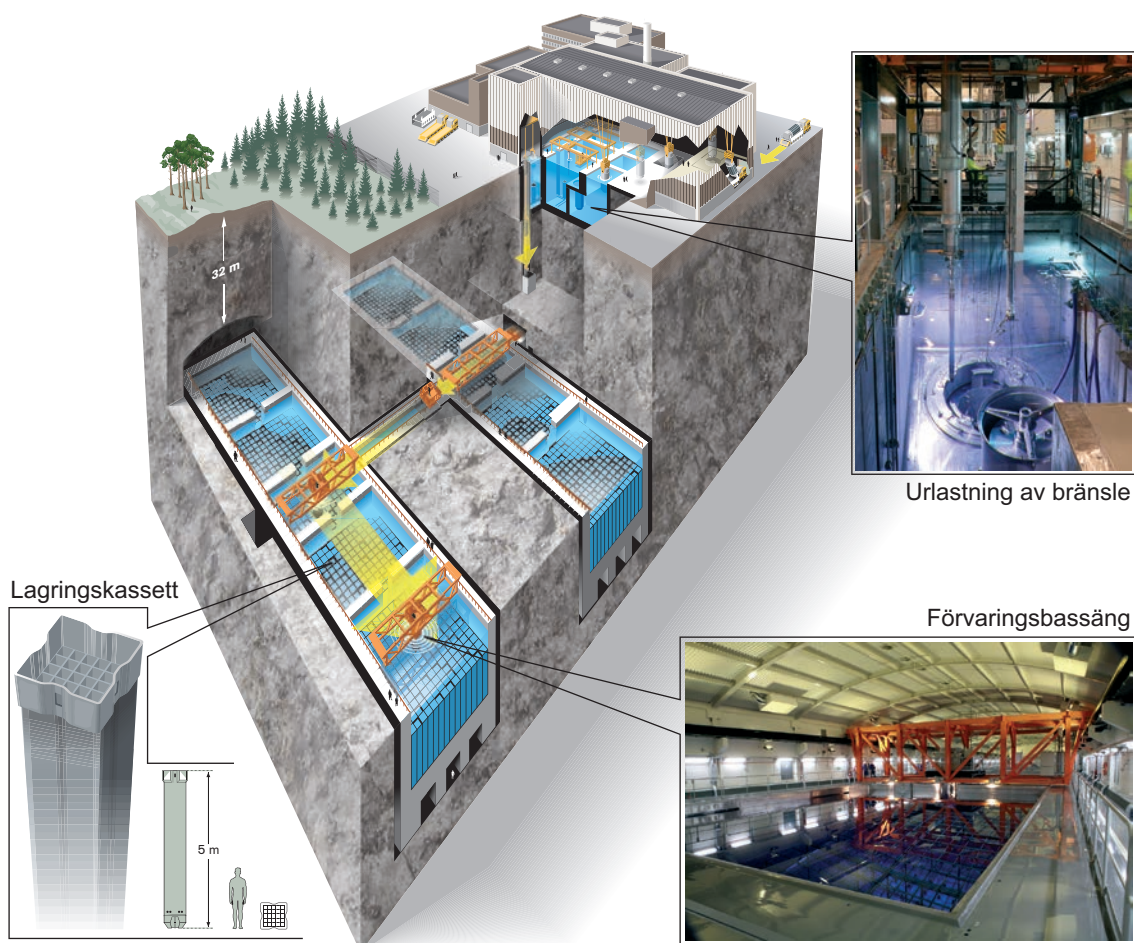
SKB:s mellanlager för använt kärnbränsle, Clab, har varit i drift sedan 1985. SKB planerar att bygga en anläggningsdel för inkapsling av kärnbränslet i anslutning till Clab samt att bygga ett slutförvar, Kärnbränsleförvaret, i Forsmark. Förutom dessa anläggningar planerar SKB att bygga en kapsel-fabrik i Oskarshamn där den slutgiltiga maskinbearbetningen, monteringen och kvalitetssäkringen av kopparkapslarna ska göras. Vidare behöver transportsystemet kompletteras med en ny typ av transportbehållare för kapslar med använt kärnbränsle.



Figur 1-4. M/s Sigrid samt transportbehållare för kortlivat radioaktivt avfall (ATB) och för härdkomponenter (TK).

Centralt mellanlager för använt kärnbränsle, Clab

Clab är lokaliserat vid kärnkraftverket i Oskarshamn. Det använda kärnbränslet mellanlagras i anläggningens vattenbassänger, se figur 1-5. Clab består av en mottagningsdel i marknivå och en förvaringsdel drygt 30 meter under markytan. I mottagningsdelen tas transportbehållarna med det använda kärnbränslet emot och lastas ur under vatten. Bränslet placeras därefter i lagringskassetter. Två typer av kassetter, normalkassetter och kompaktkassetter, används. Förutom använt kärnbränsle mellanlagras i dag även styrstavar från kokvattenreaktorer samt härdkomponenter.



Figur 1-5. Det centrala mellanlagret för använt kärnbränsle, Clab.

Själva lagringsutrymmet består av två bergrum med cirka 40 meters avstånd som förbinds med en vattenfylld transportkanal. Varje bergrum är ungefär 120 meter långt och innehåller fyra lagringsbassänger och en reservbassäng. Bränslets överkant står åtta meter under vattenytan. Vattnet i bassängerna tjänar både som strålskärm och kylmedel. Vid bassängkanten är strålningsnivån så låg att personalen kan vistas där utan restriktioner.

Vid årsskiftet 2012/2013 fanns 5 577 ton bränsle (räknat som ursprunglig mängd uran) i anläggningen. SKB har tillstånd att lagra 8 000 ton bränsle i anläggningen. Enligt dagens prognoser beräknas denna lagringsmängd nås 2023. Bassängerna kan rymma totalt cirka 11 000 ton bränsle. En utökning av lagringskapaciteten kräver ett nytt tillstånd. I avsnitt 2.3.2 redovisas SKB:s översiktliga planering för att öka lagringskapaciteten i Clab.

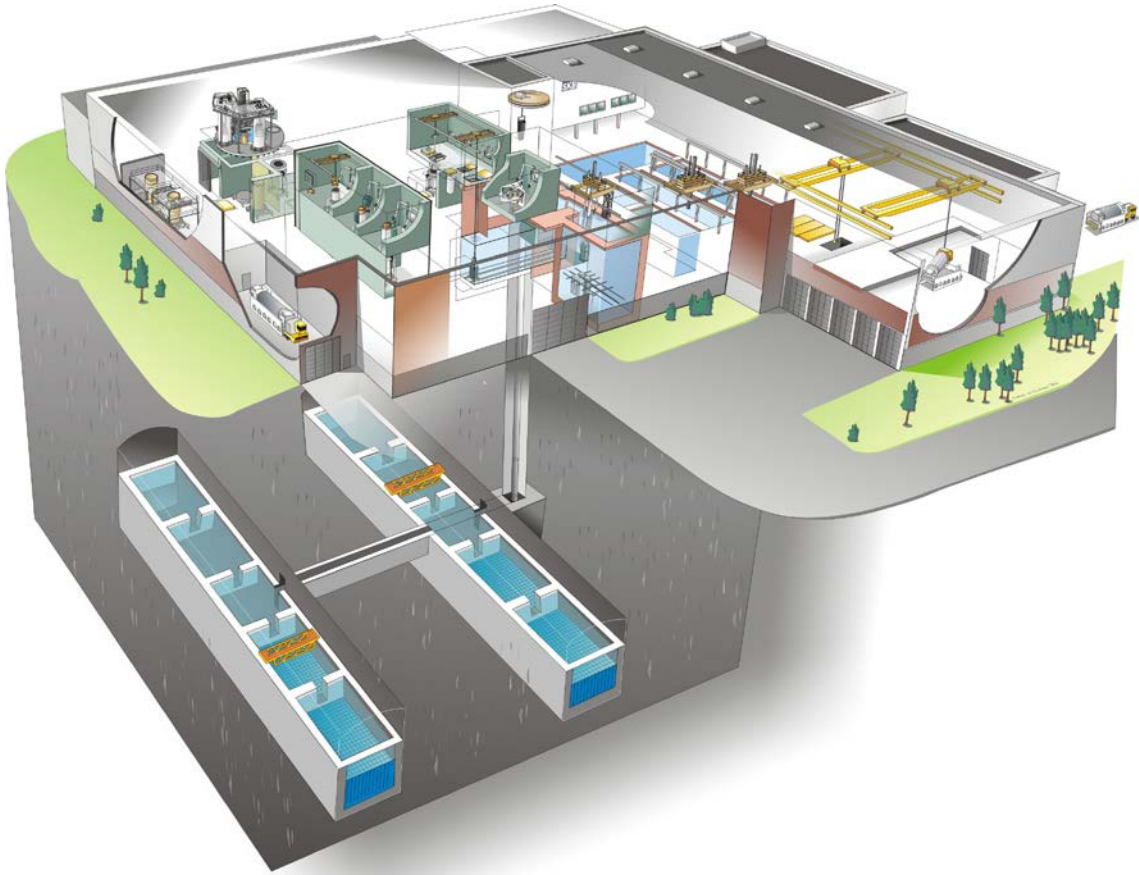
Central anläggning för hantering, mellanlagring och inkapsling av det använda kärnbränslet, Clink

Innan det använda kärnbränslet deponeras ska det kapslas in i kopparkapslar. SKB planerar att kapsla in bränslet i en ny anläggningsdel i anslutning till Clab, se figur 1-6 och figur 1-7. När denna inkapslingsdel sammankopplats med Clab kommer de båda anläggningsdelarna att drivas som en integrerad anläggning, Clink.

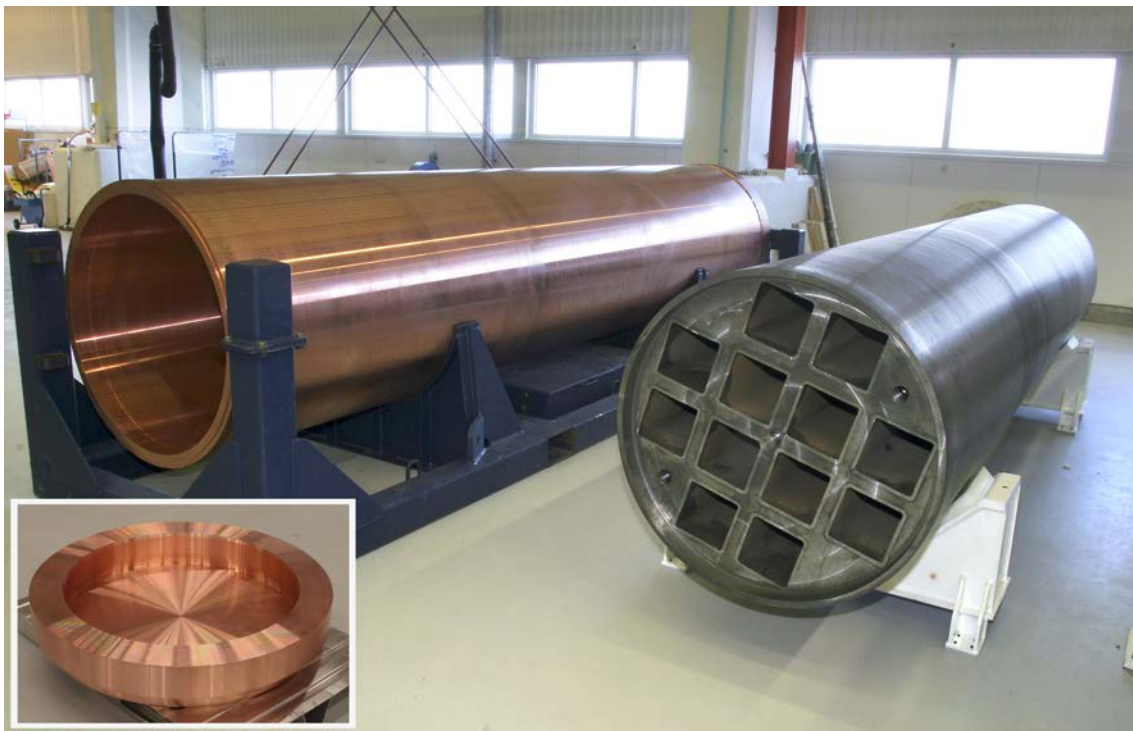
Kapseln som ska användas består av ett kopparkärl som ska skydda mot korrosion och en insats av segjärn som ska motstå mekaniska belastningar, se figur 1-8. Det finns två typer av insatser, en som rymmer tolv element från kokvattenreaktorer (BWR) och en som rymmer fyra element från tryckvattenreaktorer (PWR). Det finns även andra bränsletyper som ska slutförvaras, se avsnitt 1.1.4. Dessa kan placeras i någon av de två insatstyperna. Enligt planerna kommer SKB att bygga en kapselfabrik i Oskarshamn där kapselns olika komponenter slutgiltigt maskinbearbetas, monteras och kvalitetssäkras. Kapselfabriken kommer inte att vara en kärnteknisk anläggning.



Figur 1-6. Bildmontage som visar den integrerade anläggningen för mellanlagring och inkapsling, Clink. De röda markeringarna anger planerad byggnad för inkapslingsdelen samt en mindre terminalbyggnad.



Figur 1-7. I Clink kommer bränslet att föras från mellanlagringsbassängerna under mark till inkapslingsdelen med dess olika arbetsstationer.



Figur 1-8. Kopparkapsel med insats av segjärn (det infällda fotot visar kopparlocket).

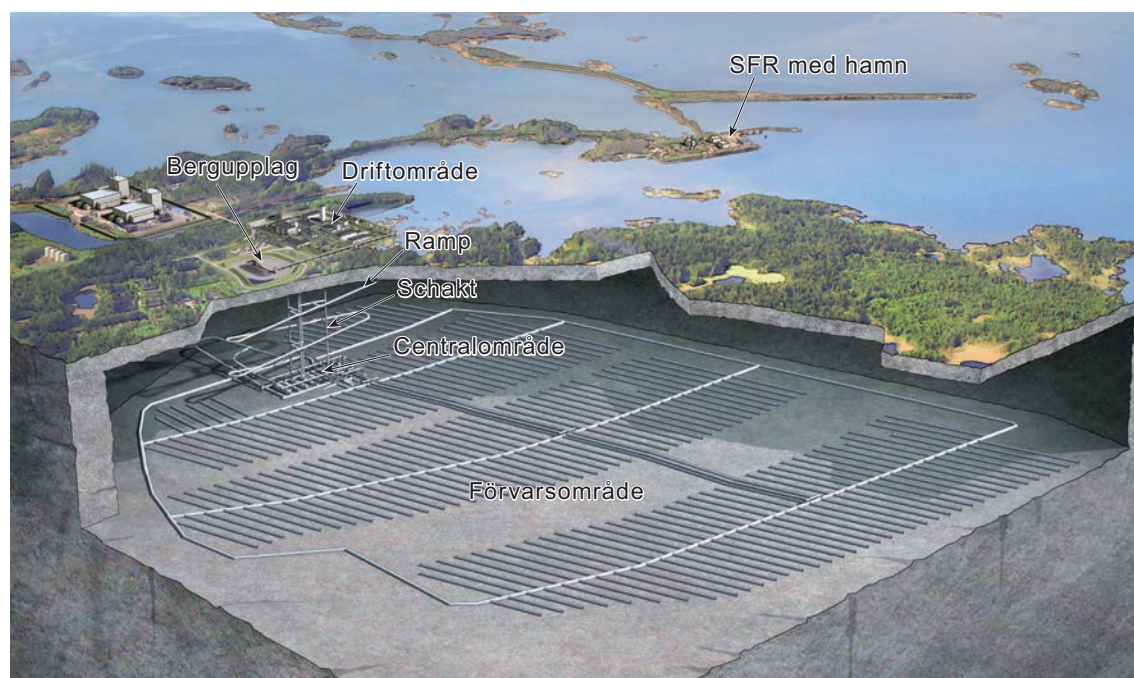
I Clink kommer det att finnas ett antal stationer för olika arbetsmoment. All hantering av bränslet manövreras på avstånd. Inkapslingsprocessen inleds med att bränslet förs från förvaringsbassängerna under mark till bassänger i den nya anläggningsdelen. De bränsleelement som ska placeras tillsammans i en kapsel väljs ut på ett sådant sätt att den totala värmeeffekten i kapseln inte blir för stor. Bränslet torkas därefter i en strålskärmad hanteringscell och lyfts över till kapseln. Luften i kapseln byts ut mot argon innan den försluts. Förslutningen av kopparkapseln görs med friktionsomrörningssvetsning (Friction Stir Welding). Svetsens kvalitet kontrolleras och om svetsen godkänns förs kapseln vidare till stationen för maskinbearbetning, där överskottsmaterial tas bort. Slutligen görs en ny kvalitetskontroll av svetsen. Vid behov rengörs kapseln innan den placeras i en speciell transportbehållare för transport till Kärnbränsleförvaret. Clink dimensioneras för att kunna kapsla in 200 kapslar per år.

Kärnbränsleförvaret

Arbetet med att finna en lämplig plats för ett slutförvar för använt kärnbränsle har pågått i flera decennier. I slutet av platsvalsprocessen stod valet mellan Forsmark i Östhammars kommun och Laxemar i Oskarshamns kommun. Efter utvärderingar av platsundersökningarna valde SKB Forsmark som plats för slutförvaret för använt kärnbränsle. Avgörande för valet var att förutsättningarna för att åstadkomma ett långsiktigt säkert förvar bedömdes vara bättre i Forsmark.

Slutförvarsanläggningen kommer att bestå av en ovanmarksdel och en undermarksdel, se figur 1-9. Undermarksdelen utgörs av ett centralområde och ett flertal deponeringsområden samt förbindelser till ovanmarksdelen i form av en ramp för fordonstransporter samt schakt för hissar och ventilation. Deponeringsområdena, som tillsammans utgör förvarsområdet, kommer att ligga cirka 470 meter under marknivån och bestå av ett stort antal deponeringstunnlar med borrhålor i botten på tunnlarna. Placeringen av deponeringstunnlarna, liksom det inbördes avståndet mellan deponeringshål, bestäms utifrån bergets egenskaper, bland annat läget av stora deformationszoner, förekomst av stora eller mycket vattenförande sprickor och bergets värmeledningsförmåga. Anläggningen ovan mark omfattas av driftområde, bergupplag, ventilationsstationer och förråd. Anläggningen dimensioneras för en deponeringskapacitet på 200 kapslar per år.

När transportbehållarna med kapslar anländer till Kärnbränsleförvaret lastas de om till ett specialbyggt transportfordon som via rampen för ner kapslarna till deponeringsnivån. Därefter lastas de om till deponeringsmaskinen för att transporteras ut till deponeringsområdet och slutligen deponeras.



Figur 1-9. Kärnbränsleförvaret i Forsmark.

Efter att kapslarna placerats i deponeringshålen, omgivna av bentonitlera, fylls tunneln igen med svällande lera och försluts med en betongplugg. När allt bränsle har deponerats fylls även övriga utrymmen igen och anläggningarna ovan mark avvecklas.

Transportsystem för använt kärnbränsle

Transportsystemet består av fartyget m/s Sigrid, specialfordon och olika typer av transportbehållare. Fartyget och fordonen används också för transporter av låg- och medelaktivt avfall.

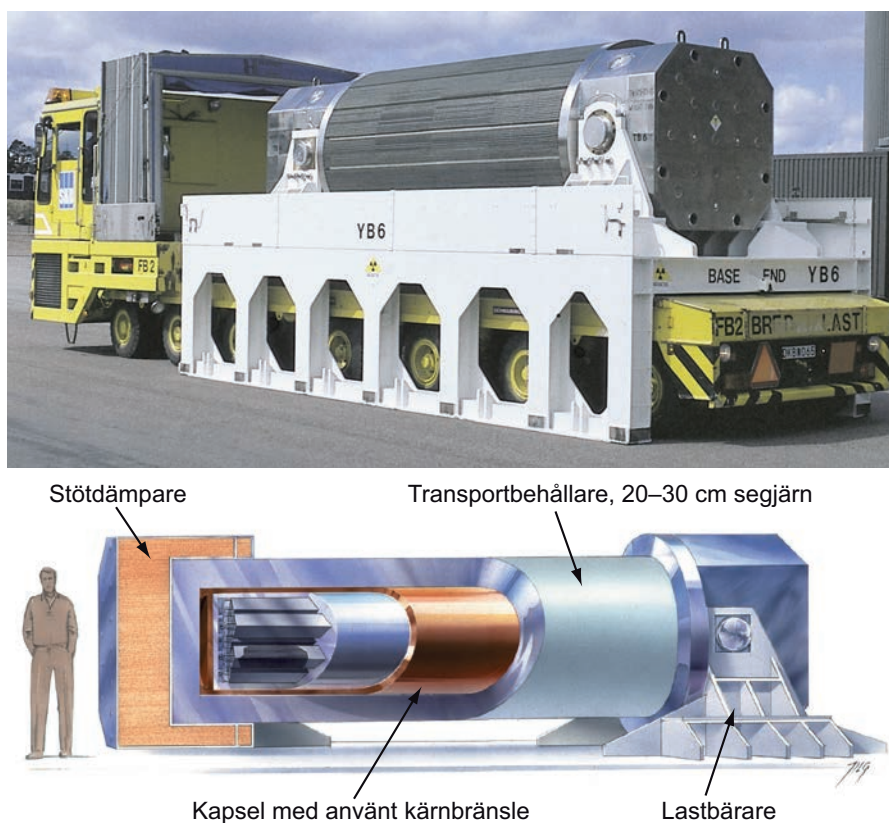
Det använda kärnbränslet transporteras i dag från kärnkraftverken till Clab i behållare (TB) med cirka 30 centimeter tjocka stålväggar, se figur 1-10. Dessa behållare är försedda med kylflansar för att kyla bort den värme som alstras på grund av bränslets resteffekt.

För transport av inkapslat använt kärnbränsle från Clink till Kärnbränsleförvaret kommer en ny typ av transportbehållare (KTB) att tas fram.

1.5.3 Anläggningar för forskning, utveckling och demonstration

Forskning och utveckling för inkapsling och slutförvaring av använt kärnbränsle behöver i många delar utföras i en realistisk miljö och i full skala. För detta ändamål har SKB tre laboratorier: Äspö-laboratoriet, Kapsellaboratoriet och Bentonitlaboratoriet. Där utför SKB forsknings- och utvecklingsprojekt främst för barriärerna i Kärnbränsleförvaret. SKB bedriver även forsknings- och utvecklingsarbete i nära samarbete med Posiva i Onkalo. Resultaten från försöken och projekten i laboratorierna ger underlag för utformningen av Kärnbränsleförvaret och inkapslingsanläggningen samt till de säkerhetsanalyser som ska genomföras.

Laboratorierna ger också en möjlighet att demonstrera att barriärerna kan tillverkas och installeras med den kvalitet som krävs för att uppfylla kraven på långsiktig säkerhet. Detta är en viktig del av arbetet med att visa att slutförvarets initialtillstånd, som utgör utgångspunkten för analysen av den långsiktiga säkerheten, kan uppnås.



Figur 1-10. Transportbehållare för använt kärnbränsle (TB, överst) och för kapslar med använt kärnbränsle (KTB, underst).

Tillgången till laboratorierna har haft en central betydelse för utvecklingen av KBS-3-metoden samt i arbetet med att informera om de framsteg som fortlöpande uppnås i verksamheten.

Äspölaboratoriet

Äspölaboratoriet anlades under perioden 1990–1995 och verksamheten är en vidareutveckling av det arbete som tidigare bedrevs i Stripa gruva i Bergslagen. Laboratoriet är beläget på ön Äspö norr om Oskarshamns kärnkraftverk, se figur 1-11. Det underjordiska laboratoriet består av en tunnel från Simpevarpshalvön, där Oskarshamns kärnkraftverk ligger, till södra delen av Äspö. På Äspö fortsätter huvudtunneln i två spiralvarv ned till ett djup av 460 meter. De olika experimenten och demonstrationsförsöken äger rum i nischer och korta tunnlar som grenar ut från huvudtunneln. En illustration över laboratoriet visas i figur 1-12.

Äspölaboratoriet har haft en central betydelse avseende utveckling, test och verifiering av teknik och metoder för de platsundersökningar som genomförts i Laxemar och Forsmark. Det spelar samma roll inför de kommande detaljundersökningarna i Kärnbränsleförvaret i Forsmark.

Laboratoriet används också till att undersöka hur barriärerna i slutförvaret för använt kärnbränsle (kapseln, bufferten, återfyllning, förslutning och berget) hindrar de radioaktiva ämnena i det använda bränslet från att nå markytan.

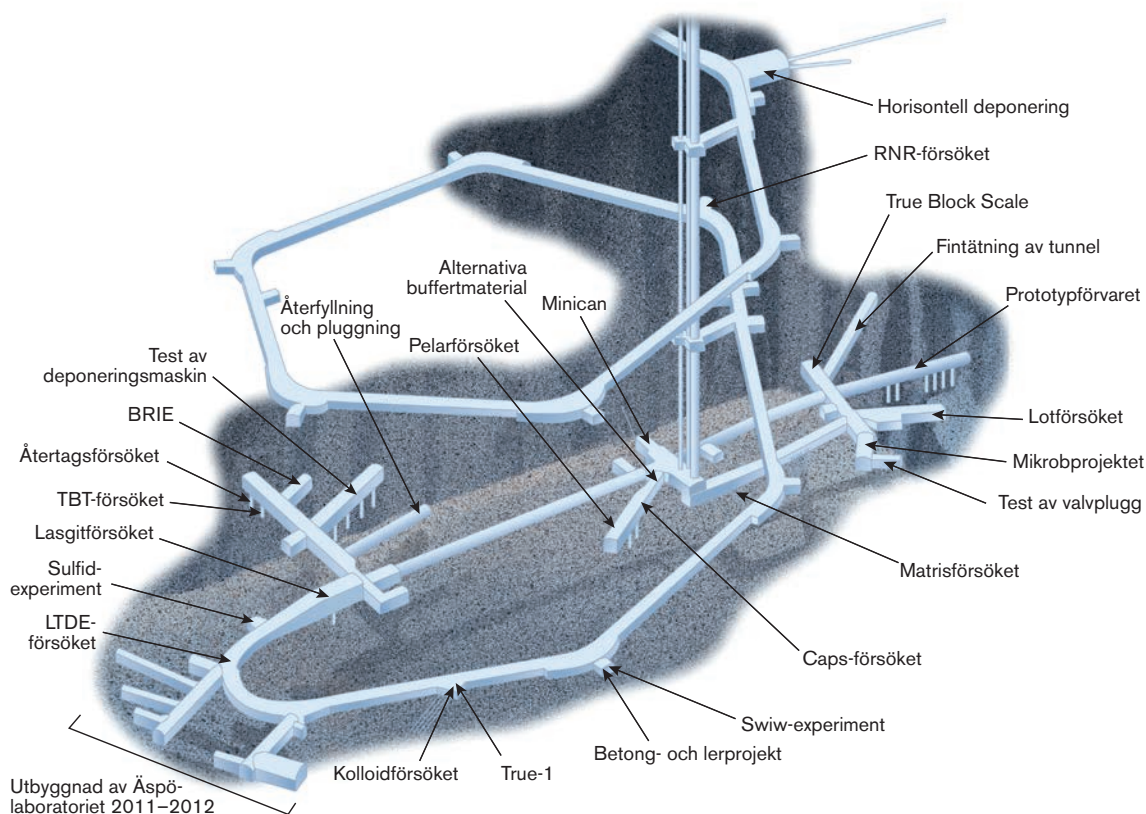
Ett annat viktigt syfte är att utveckla och demonstrera metoder för att bygga och driva Kärnbränsleförvaret. Här finns alla KBS-3-metodens delsystem tillgängliga för demonstration i realistisk miljö.

I framtiden kommer anläggningen att användas för att utbilda och träna den personal som ska arbeta i Kärnbränsleförvaret. Laboratoriet kommer därför att vara i drift ungefär fram till dess att Kärnbränsleförvaret tas i drift.

För de kommande säkerhetsanalyserna av SFR och SFL kan forskningsexperiment liknande dem som i dag genomförs för Kärnbränsleförvaret komma att behövas. De yttligare delarna av anläggningen kan tillgodose försök för SFR:s behov, medan de djupare passar för att studera förekommande processer och testa teknik som stöd för realisering av SFL. Redan i dag pågår SFR- och SFL-relaterade experiment med syfte att bland annat studera hur cylindriska betongbehållare, med olika (inaktiva) avfallsmaterial, åldras i verklig förvarsmiljö.



Figur 1-11. Äspölaboratoriet beläget på ön Äspö norr om Oskarshamns kärnkraftverk.



Figur 1-12. Äspölaboratoriet.

Flera olika länder och organisationer deltar i de försök som görs vid Äspölaboratoriet. I olika former och projektgrupper arbetar SKB tillsammans med systerorganisationer, forskningsinstitut och universitet i bland annat Finland, Frankrike, Japan, Kanada, Schweiz, Tjeckien och Tyskland. De internationella kontakterna är viktiga för att jämföra olika metoder för beräkningar och analyser samt för att få en grundligare diskussion och värdering av resultaten. Samarbetet ger oss också möjlighet att anlita välrenommerade experter inom olika områden.

Kapsellaboratoriet

Kapsellaboratoriet ligger inom hamnområdet i Oskarshamn och byggdes under perioden 1996–1998. På Kapsellaboratoriet testas och utvecklas tekniken för att svetsa botten och försluta locket på kapseln. Även de metoder som SKB kommer att använda för att kontrollera kapselns delar och svetsar utvecklas och demonstreras här. Utvecklingen av de metoder som ska användas vid tillverkning av kapselns delar leds från laboratoriet. Undersökning och utvärdering sker till stor del på Kapsellaboratoriet medan tillverkningsförsöken görs hos externa leverantörer. Målet är att utveckla metoder för tillverkning och kontroll som uppfyller fastställda kvalitetskrav och som har tillräckligt hög tillförlitlighet för att användas i den framtida kapselproduktionen och i Clink. Viktiga utrustningar som finns i laboratoriet är ett system för friktionsomrörningssvetsning med roterande verktyg, utrustningar för oförstörande provning samt hanteringssystem för fullstora kapslar. Figur 1-13 visar utrustningen för friktionsomrörningssvetsning.

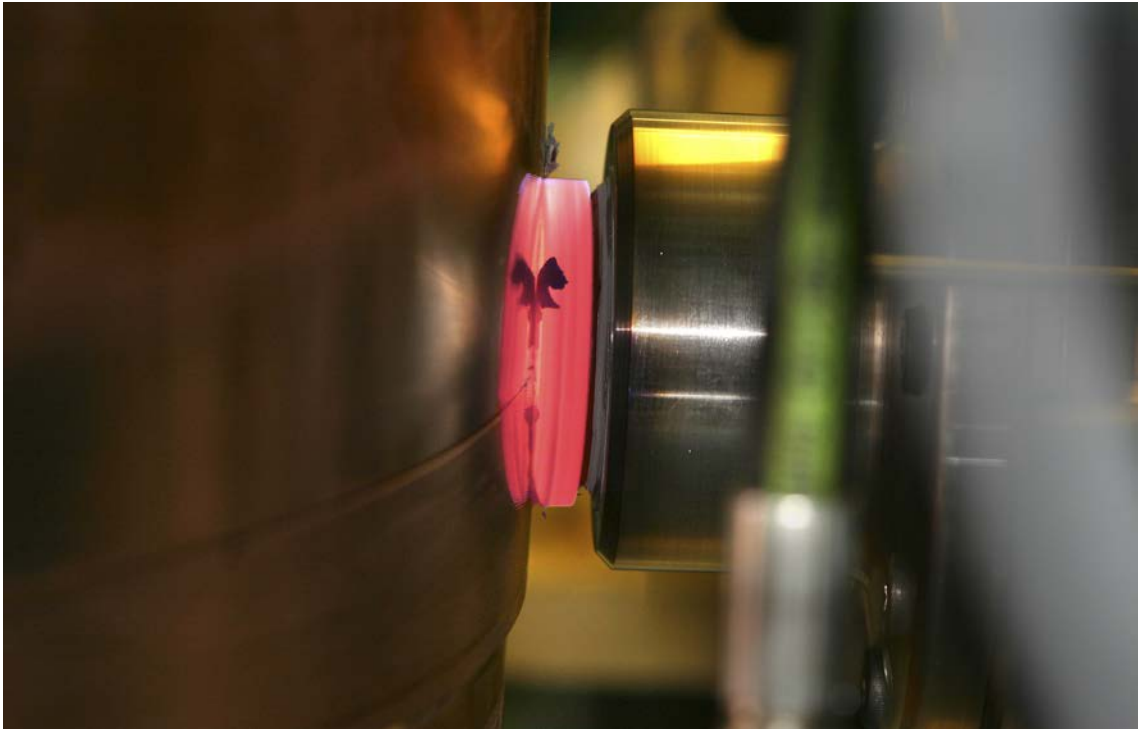
SKB planerar även att använda anläggningen för utbildningsändamål inför den framtida produktionen, bland annat inför driftsättningen av inkapslingen i Clink. Kapsellaboratoriet kommer därför enligt planerna att vara i bruk fram till dess att inkapslingen av det använda kärnbränslet påbörjas.

Bentonitlaboratoriet

Sedan 2007 bedriver SKB forskning och utveckling i Bentonitlaboratoriet i Oskarshamn, se figur 1-14. Anläggningen ligger i direkt anslutning till Äspölaboratoriet och kompletterar de försök som görs där.

Kärnbränsleförvarets långsiktiga säkerhet bygger på flera barriärer som ska hindra frigjorda radioaktiva ämnen från kapseln att nå markytan. En av barriärerna är den svällande lera, bentonit, som ska omge kapseln. Bentonit kommer även att användas för återfyllning av tunnlarna i förvaret. I Bentonitlaboratoriet testar SKB bentonitens egenskaper bland annat genom att simulera olika vattenförhållanden på ett kontrollerat sätt. I laboratoriet utvecklar SKB även metoder för att fylla igen förvarets tunnlar med återfyllningsmaterial och bygga pluggar för att försluta deponeringstunnlarna.

De tester som genomförs i laboratoriet är ofta förberedande tester i olika skalor och omfattning inför tester i full skala på försvarsdjup i Äspölaboratoriet. I laboratoriet finns också utrustning och utrymme för mottagning av bentonitleveranser och blandning av bentonit till önskad vattenhalt.



Figur 1-13. Kapsellaboratoriets utrustning för utveckling av friktionsomrörningssvetsning (Friction Stir Welding).



Figur 1-14. Bentonitlaboratoriet.

2 Handlingsplan

Detta kapitel ger en bild av SKB:s planering för att uppföra och ta i drift nya anläggningar och nya anläggningsdelar vid befintliga anläggningar. Kapitlet ger en beskrivning av nuläget samt SKB:s planering för att genomföra kärnavfallsprogrammet.

Grundläggande för SKB:s utveckling är att den löpande verksamheten ska bedrivas säkert och effektivt samtidigt som nya verksamheter förbereds och byggs upp. En viktig del i detta arbete är att löpande säkerställa och utveckla SKB:s kompetens och organisation, såväl i det dagliga arbetet som för framtiden.

2.1 Huvudtidsplan

Figur 2-1 visar den övergripande tidsplanen för hela kärnavfallsprogrammet. Planen redovisar översiktligt de åtgärder som behövs för att genomföra programmet samt när SKB planerar att lämna in ansökningar och andra lagstadgade redovisningar såsom återkommande säkerhetsredovisningar.

Processen att uppföra och ta i drift en ny anläggning eller anläggningsdel genomgår olika faser. Innan uppförandet kan påbörjas ska ansökningar enligt kärntekniklagen och miljöbalken om att få uppföra, inneha och driva anläggningen lämnas in och godkännas. Under tillståndsprövningen granskas ansökningarna av SSM och Mark- och miljödomstolen efter att dessa fått in synpunkter från olika remissinstanser. Regeringen kan, efter att tillfrågad kommun givit sitt medgivande enligt vetoparagrafen i miljöbalken, besluta om tillåtlighet och tillstånd. Därefter fastställs villkor enligt kärntekniklagen av SSM och enligt miljöbalken av Mark- och miljödomstolen. Innan en kärnteknisk anläggning får uppföras ska en preliminär säkerhetsredovisning (PSAR), liksom en beskrivning av hur uppförandet av anläggningen påverkar säkerheten under drift och för slutförvar även efter förslutning, sammanställas och lämnas in till SSM för godkännande. Detta förfarande gäller även större ombyggnader eller större ändringar av en befintlig anläggning. För nya anläggningar krävs även bygglov från aktuell kommun.

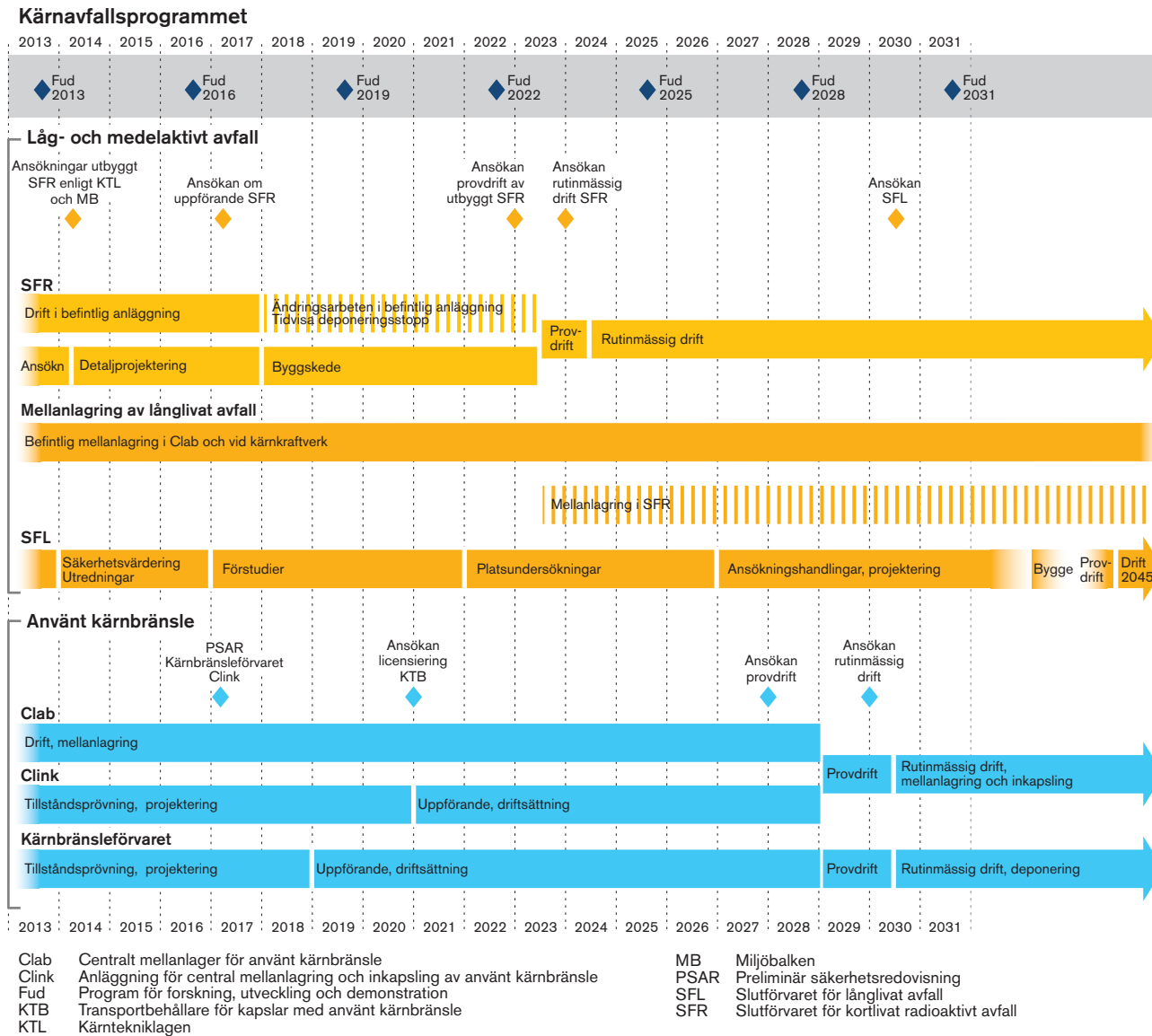
SKB lämnar in ansökningar till SSM om att inleda provdrift när system och processer prövats och fungerar som avsett. Provdraft innebär att kärnämne alternativt radioaktivt avfall tillförs till, och hanteras i, respektive anläggning. Innan provdrift av en anläggning får påbörjas ska säkerhetsredovisningen förnyas (till en SAR) så att den avspeglar anläggningen som den är byggd. Innan anläggningarna får tas i rutinmässig drift ska säkerhetsredovisningarna kompletteras med beaktande av erfarenheter från provdriften.

I de följande avsnitten redovisas handlingsplanerna för låg- och medelaktivt avfall respektive använt kärnbränsle.

2.2 Handlingsplan för låg- och medelaktivt avfall

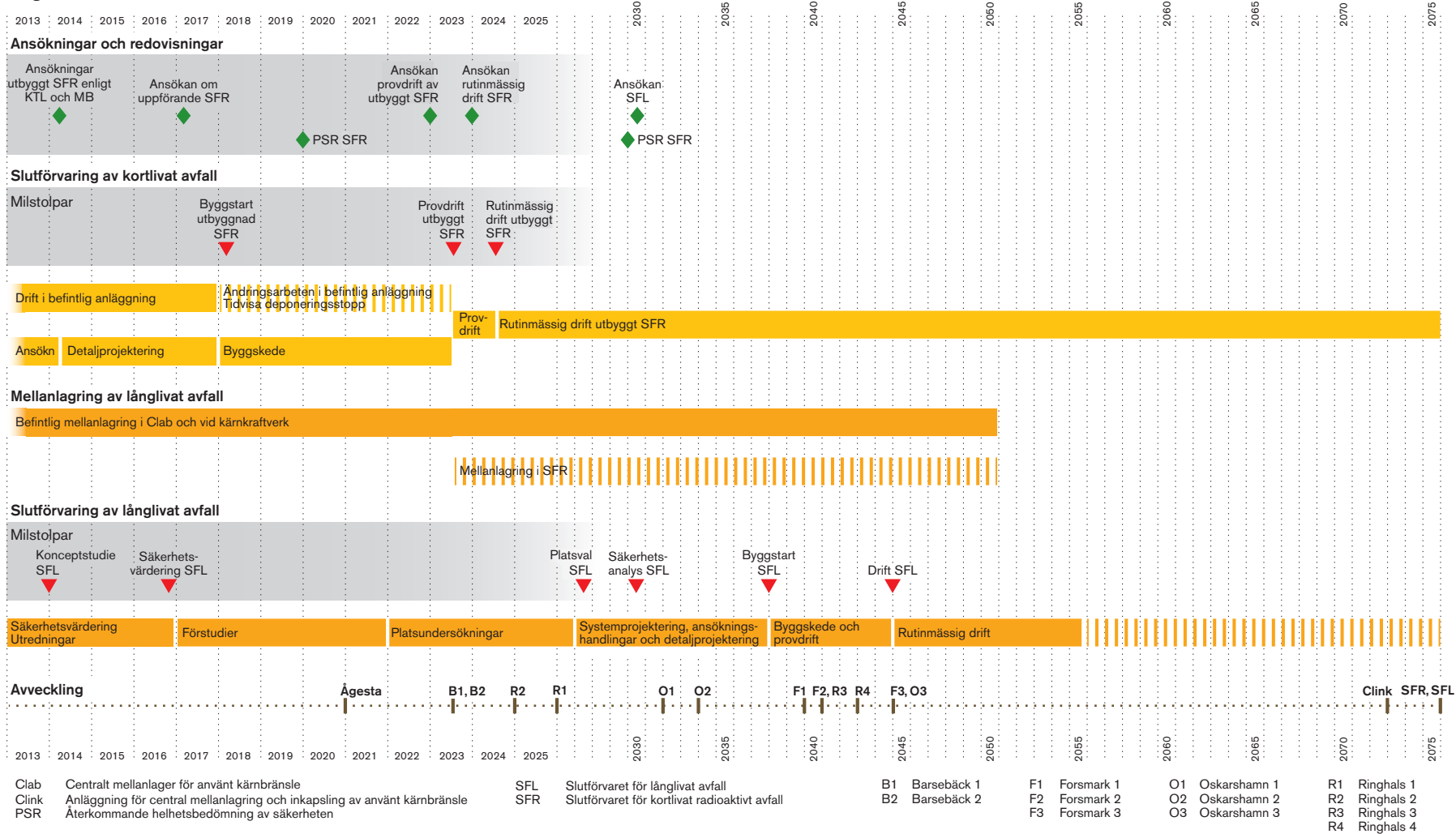
SKB:s verksamhet för låg- och medelaktivt avfall innefattar såväl hantering av befintligt avfall som planering och arbete med uppbyggnad av det system som behövs för att omhänderta framtida låg- och medelaktivt avfall på ett säkert sätt. De slutförvarsanläggningar som SKB planerar att etablera för låg- och medelaktivt avfall omfattar en utbyggnad av SFR (Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall) och uppförande av SFL (Slutförvaret för långlivat avfall). SKB utreder även frågan om markförvar för avfall med mycket låg aktivitet.

I detta avsnitt beskrivs nuläget för denna verksamhet kortfattat varefter den övergripande planeringen för kommande aktiviteter redovisas för kortlivat respektive långlivat låg- och medelaktivt avfall. Figur 2-2 illustrerar en översiktlig tidsplan tillsammans med viktiga milstolpar där streckade staplar i tidsplanen markerar både osäkerheter och flexibilitet i planeringen. För att tydliggöra kopplingen mellan verksamheten för låg- och medelaktivt avfall och avvecklingen av kärnkraftverken illustreras även denna planering i figuren, där startår för nedmontering och rivning anges för varje reaktor.



Figur 2-1. Huvudtidsplan för SKB:s kärnavfallsprogram. Streckade staplar markerar osäkerheter och flexibilitet i planeringen.

Låg- och medelaktivt avfall



Figur 2-2. Tidsplan för arbete med låg- och medelaktivt avfall samt avveckling av kärnkraftverken. Streckade staplar markerar osäkerheter och flexibilitet i planeringen.

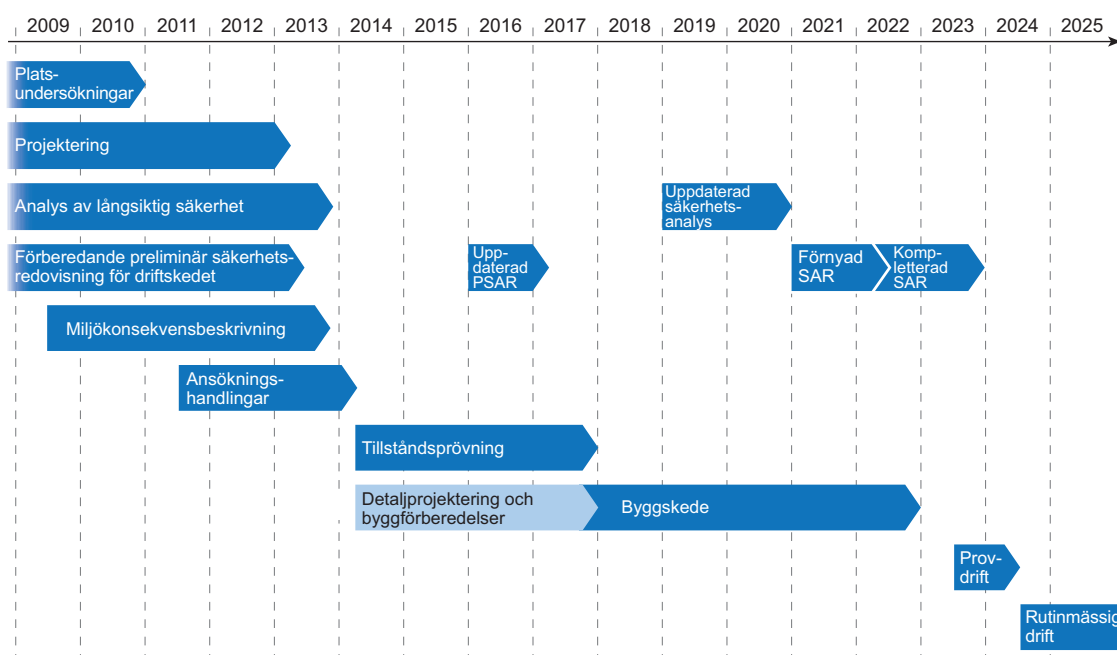
Utgångspunkten är att reaktorerna i Forsmark, Oskarshamn och Ringhals 3 och 4 drivs i 60 år, medan Ringhals 1 och 2 drivs i 50 år. De första reaktorerna i Sverige som kommer att nedmonteras och rivs är reaktorerna i Barsebäck och Ågesta samt forskningsreaktorerna på Studsviks industriområde. Nedmontering och rivning bedöms ta fem till sju år beroende på bland annat reaktorns storlek.

Nuläget för arbetet med låg- och medelaktivt avfall kan sammanfattas i följande punkter:

- Ansökningarna enligt kärntekniklagen och miljöbalken för att bygga ut SFR kommer att lämnas in under våren 2014.
- SKB vill ha möjlighet att kunna mellanlagra långlivat avfall i SFR. I ansökningarna om att bygga ut SFR, behandlas därför även mellanlagringen av långlivat avfall som en del av verksamheten.
- Platsspecifika studier för avveckling av kärnkraftverken i Forsmark, Oskarshamn och Ringhals som beskriver avfallsinventarium, teknik och kostnader har slutförts under sommaren 2013.
- SKB har, baserat på resultaten i de platsspecifika studierna för avveckling, kommit fram till att cirka hälften av det kortlivade lågaktiva avfallet från nedmontering och rivning av kärnkraftverken i Forsmark, Oskarshamn och Ringhals skulle kunna slutförvaras i markförvar i stället för i SFR.
- En studie av olika förvarskoncept för SFL pågår och kommer att presenteras i slutet av 2013. Målet med studien är att välja ett eller ett par förvarskoncept att arbeta vidare med.
- En ny avfallstransportbehållare för transport av ståltankar med långlivat låg- och medelaktivt avfall (ATB 1T) är under framtagande.
- Som alternativ till mellanlagring av BWR-styrstavar i bassängerna i Clab undersöker SKB möjligheten till torr mellanlagring. Därför har metoder för segmentering av styrstavar studerats samt lämpliga behållare för mellanlagring och framtida deponering i SFL utvärderats, se avsnitt 8.2.

2.2.1 Kortlivat låg- och medelaktivt avfall

En översiktlig tidsplan för utbyggnaden av SFR presenteras i figur 2-3. De olika skedena i tidsplanen diskuteras mer utförligt nedan.



Figur 2-3. Översiktlig tidsplan för utbyggnad av SFR.

Jämfört med de planer som redovisades i Fud-program 2010 har drifttagandet av det utbyggda SFR försenats med tre år till 2023. Den huvudsakliga anledningen till förseningen är att SKB nu bedömer att uppförandet av anläggningen tar längre tid, men också på att mer tid avsatts för tillståndsprövningen, vilket SSM efterfrågat i granskningen av Fud-program 2010 och i samråden med SKB. Den främsta anledningen till att uppförandet tar längre tid är att bergssalarna förläggs på ett större djup.

Framtagning av ansökningshandlingar

Projekt SFR-utbyggnad startade 2008. Det har i ett första skede till uppgift att utarbeta ansökningshandlingar enligt kärntekniklagen respektive miljöbalken samt en anläggningsbeskrivning för ett utbyggt SFR. Ansökningshandlingarna planeras att vara klara under våren 2014 för att lämnas in till SSM respektive Mark- och miljödomstolen för beredning till regeringen. Projektet omfattar platsundersökningar, övergripande projektering av anläggningen, analys av långsiktig säkerhet, analys av driftsäkerhet, samråd om och framtagning av miljökonsekvensbeskrivning, sammanställande av ansökningshandlingar samt vissa byggförberedelser. Det sistnämnda innefattar bland annat framtagning av systemhandlingar.

I ansökningarna kommer aktivitetsinventariet utöver driftavfall även att omfatta avfall från nedmontering och rivning. De uppskattade mängderna baseras på avfallsprognoser från de nyligen färdigställda platsspecifika studierna för avveckling samt på förnyade avfallsprognoser för driftavfall. I samband med ansökningarna om att bygga ut SFR planerar SKB att ansöka om att få deponera både driftavfall och avfall från nedmontering och rivning i hela anläggningen. På så vis ges bättre förutsättningar att optimera styrningen av avfallsströmmar till SFR.

SKB kommer i ansökningarna för utbyggnaden även att ansöka om att kunna mellanlagra långlivat avfall från kärnkraftverken i SFR. I den säkerhetsredovisning som kommer att ingå i ansökningarna behandlas mellanlagringen av långlivat avfall som en del av verksamheten. Säkerhetsrisken det innebär att förvara SFL-avfall i SFR utvärderas i en säkerhetsanalys. När SFL tas i drift kommer det mellanlagrade långlivade avfallet att överföras till SFL.

Tillståndsprövning och detaljprojektering

Tillståndsprövningen startar när ansökningarna enligt miljöbalken och kärntekniklagen har lämnats in i våren 2014. Då ska ansökningarna handläggas och granskas av myndigheter, Mark- och miljödomstol, kommun och regering. Under denna period ligger initiativet till stor del hos dessa instanser och tidsåtgången beror på deras handläggnings- och beslutstider. SKB:s huvuduppgifter under denna tid är att på olika sätt medverka i tillståndsprocessen, samt att förbereda arbetet med att genomföra utbyggnaden av SFR. Inför tillstånd om uppförande finns formellt krav på att en preliminär säkerhetsredovisning (PSAR) ska upprättas. I detta skede kommer därför en PSAR tas fram för ansökan om uppförande.

Parallellt med tillståndsprövningen pågår detaljprojektering och byggförberedelser. Förutsatt att tillståndsprocessen inte drar ut på tiden förväntas nödvändiga tillstånd erhållas så att bygget kan inledas i början av 2018. Under detta skede ska även andra erforderliga tillstånd inhämtas, så som bygglov för utbyggnad av ovanmarksanläggningen samt anmälan av de anläggningsändringar som ska ske.

Utbyggnad och överlämning till driftorganisation

Skedet för utbyggnad och överlämning till driftorganisation omfattar aktiviteterna bygge, provdrift och överlämning till rutinmässig drift. Under byggskedet kan tidvisa deponeringsstopp komma att bli nödvändiga, åtminstone när bergarbete pågår. Samtidigt som SFR byggs ut kommer den befintliga anläggningen att upgraderas, bland annat med hänsyn till att drifttiden förlängts i förhållande till den ursprungligt planerade.

Innan provdrift påbörjas tas en SAR fram. Denna ska senare kompletteras med erfarenheter från provdriften innan den rutinmässiga driften tar vid. SKB planerar att lämna in ansökan om provdrift vid årsskiftet 2022/2023. Provdraft med deponering av avfall i den utbyggda delen av SFR antas starta cirka sex månader senare. SKB planerar att lämna in ansökan om rutinmässig drift vid årsskiftet 2023/2024. Tillstånd för rutinmässig drift antas till halvårsskiftet 2024.

Utbyggnaden av SFR får inte påverka säkerheten i det befintliga SFR. För att säkerställa detta kommer SKB att tillämpa vid tillfället gällande system för säkerhetsledning med definierade driftledningsnivåer, vilket i dag innebär en rutinmässig övervakning och uppföljning av de beslut som fattas i säkerhetsfrågor. Varje ärende för anläggningsändring kommer att säkerhetsgranskas enligt de rutiner som gäller på SKB för primär och fristående säkerhetsgranskning.

2.2.2 Långlivat låg- och medelaktivt avfall

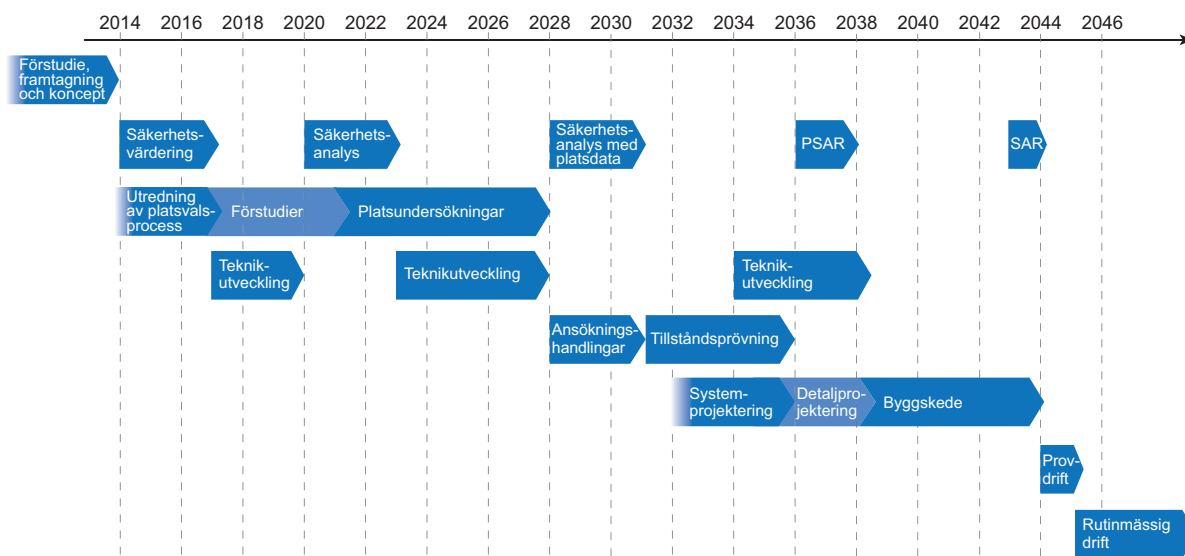
En översiktlig tidsplan för arbetet med SFL presenteras i figur 2-4. Flera viktiga milstolpar måste passeras, såsom val av förvarskoncept och plats, utvärdering av den långsiktiga säkerheten, framtagning av ansökningar etc. SKB planerar att ansöka cirka 2030 om att få uppföra förvaret. Tidsplanen diskuteras mer i detalj i efterföljande avsnitt. Tiden från ansökningar till att ta förvaret i drift är osäker eftersom den omfattar aktiviteter i en relativt avlägsen framtid. I nuläget bedöms att SFL kan tas i rutinmässig drift cirka 2045.

SKB:s linje för utvecklingen av SFL är en stegvis och iterativ process där analyser av den långsiktiga säkerheten styr vägvalen för teknikutveckling och platsval. Processen planeras för att nå kortast möjliga utvecklingstid. Då alla nödvändiga steg i processen sammanvägs, är rutinmässig drift under första halvan av 2040-talet en rimlig bedömning. Detta ligger i linje med SKB:s nuvarande planering för rutinmässig drift 2045. Andra handlingsalternativ för drifttagande av SFL beskrivs utförligare i avsnitt 6.3.

SKB har inom ramen för projekt SFR-utbyggnad genomfört en utredning av förutsättningarna för ett mellanlager för långlivat avfall från kärnkraftverken i det utbyggda SFR. Detaljerna kommer att redovisas i de kommande ansökningarna för att bygga ut SFR. SKB undersöker också möjligheten till mellanlagring av långlivat avfall från kärnkraftverken på annan plats än i SFR.

Förslutning av SFL avses ske då allt mellanlagrat långlivat avfall samt det långlivade avfallet från nedmontering och rivning av det sista kärnkraftverket placerats där, se figur 2-2. Innan förslutningen verkställs måste SKB säkerställa att det avfall som kommer från nedmontering och rivning av Clink är lämpligt för SFR och således inte behöver slutförvaras i SFL. I figuren har denna osäkerhet i tidsplanen illustrerats med streckade staplar.

En ny avfallstransportbehållare för transport av ståltankar med långlivat låg- och medelaktivt avfall (ATB 1T) är under framtagande. Projektet drivs tillsammans med en fransk leverantör och licensiering utförs av franska myndigheter. Leverantören har visat sig ha betydande svårigheter att leverera ett koncept som uppfyller den samlade kravbilden. Mot bakgrund av den uppkomna situationen har SKB tvingats undersöka alternativa vägar för framtagning av ATB 1T. En ny tidsplan för projektet bedöms kunna fastställas i början av 2014.



Figur 2-4. Uppskattad tidsplan för arbetet inför driftsättningen av SFL.

Kommande Fud-period

Under åren 2014–2016 kommer fokus för arbetet med SFL främst att vara den värdering av den långsiktiga säkerheten som ska redovisas under 2016. Syftet med säkerhetsvärderingen är att välja huvudspår bland föreslagna förvarskoncept. Säkerhetsvärderingen kommer vidare att utveckla kravbilderna för egenskaper hos avfallet, de tekniska barriärerna och berget.

Acceptanskriterier för konditionerat avfall som ska till SFL kommer att kunna fastställas först när beslut har fattats om förvarskoncept, det vill säga tidigast efter avslutad säkerhetsvärdering. Innan ett verifierat förvarskoncept finns är det inte lämpligt att kärnkraftverken påbörjar slutlig konditionering av avfall.

En utredning kommer att påbörjas under perioden för att planera platsvalsprocessen för SFL. Baserat på resultaten från den värdering av den långsiktiga säkerheten som planeras 2016, kan preliminära krav på platsen för slutförvaret ställas och lokaliseringsfaktorer identifieras. Utifrån de identifierade lokaliseringsfaktorerna kan i ett senare skede kontakter tas med kommuner där förutsättningarna för en lokalisering bedöms som gynnsamma. Därefter inleds förstudier i intresserade kommuner.

Teknikutvecklingen av det valda förvarskonceptet påbörjas efter avslutad säkerhetsvärdering.

Perioden fram till ansökningarna

En säkerhetsanalys utan specifika platsdata planeras. Analysen utgår både från den säkerhetsvärdering som kommer att redovisas 2016 och de för SFL utvecklade tekniska lösningarna. Dessa lösningar har sin grund i det forskningsprogram som initieras baserat på resultat från säkerhetsvärderingen.

Efter att säkerhetsanalysen avslutats tar nästa steg i teknikutvecklingsarbetet vid. Arbetet syftar till att utveckla detaljerade tekniska barriärlösningar. Utveckling sker även av tekniska lösningar för driftskedet samt för återfyllning och förslutning.

Förstudiefasen i lokaliseringsarbetet avslutas och platsundersökningar inleds i början av 2020-talet på en till två platser. Platsundersökningarna förväntas leda fram till slutligt val av plats runt 2027.

Efter platsval påbörjas arbete med att ta fram underlag för ansökningar inklusive en platsspecifik säkerhetsanalys. Målsättningen är att lämna in ansökningar enligt kärntekniklagen och miljöbalken omkring 2030.

Perioden mellan ansökningarna och rutinmässig drift

Efter inlämnade ansökningar fortsätter arbetet med exempelvis systemprojektering och fortsatt utveckling av utrustning. Detaljprojektering påbörjas då tillstånd att uppföra SFL har erhållits. Uppförande och provdrift följs av rutinmässig drift runt 2045.

2.3 Handlingsplan för använt kärnbränsle

SKB:s verksamhet för den framtida hanteringen av använt kärnbränsle omfattar huvudsakligen följande delar:

- Arbete för att sköta SKB:s del av tillståndsprövningen av KBS-3-systemet.
- Teknikutveckling av KBS-3-systemet för att kunna ta det i industriell drift.
- Projekt Kärnbränsleförvaret som ansvarar för planering, projektering, uppförande och driftsättning av slutförvarsanläggningen i Forsmark.
- Projekt Clink som ansvarar för planering, projektering, uppförande och driftsättning av den integrerade anläggningen för mellanlagring och inkapsling i Oskarshamn.
- Planering för utökning av mellanlagringskapaciteten i Clab utöver 8 000 ton bränsle.
- Planering, projektering, uppförande och driftsättning av produktionssystemet för kapslar.
- Säkerhetsredovisningar för KBS-3-systemet.

De två anläggningsprojekten och arbetet med säkerhetsredovisningar för KBS-3-systemet är primära avnämare av den teknikutveckling för KBS-3-systemet som genomförs.

En förutsättning för planeringen är att driften av systemet ska starta så tidigt som möjligt, dock med realistiska tidsplaner för tillståndsprocess, uppförande och driftsättning.

Nuläget för arbetet för hantering och slutförvaring av använt kärnbränsle kan sammanfattas i följande punkter:

- Med ansökningarna 2011 som grund har SKB planerat och strukturerat det arbete som kvarstår fram till start av provdrift av KBS-3-systemets ingående anläggningar.
- Tillståndsprövningen pågår och SKB besvarar frågor och begäranden om kompletteringar till både SSM och Mark- och miljödomstolen.
- Projekt Kärnbränsleförvaret är etablerat i Forsmark och i nuläget pågår slutfasen av systemprojektering av slutförvarets anläggningsdelar och tekniska system. Ett långsiktigt arbete utförs i projektet för att bygga upp den organisation och kompetens som behövs för att implementera teknikutveckling, och i förlängningen, säker drift av Kärnbränsleförvaret. Kompensatoriska miljöåtgärder har utförts på platsen och det pågår löpande arbete med monitorering av platsen och förvaltning av byggnader, mark och borrhål.
- Arbetet med säkerhetsredovisningar för anläggningarna inom KBS-3-systemet pågår. För Kärnbränsleförvarets PSAR som ska inlämnas inför byggstart pågår ett arbete avseende både struktur och innehåll. Detta arbete utgår från erfarenheterna från upprättandet av säkerhetsredovisningarna SR-Site och SR-Drift.
- Projekt för teknikutveckling är strukturerade i enlighet med de produktionslinjer som finns etablerade för Kärnbränsleförvarets barriärer för långsiktig säkerhet. Projekten styrs övergripande av en strategisk teknikutvecklingsplan som kopplar ihop teknikutvecklingens leveranser med anläggningsprojekt och framtida säkerhetsredovisningar.

2.3.1 Översikt

Genomförandet av etableringen av KBS-3-systemets anläggningar indelas i fyra huvudskeden: tillståndsprövning (projektering), uppförande, driftsättning och drift. Uppförande och driftsättning överlappar varandra tidsmässigt, eftersom anläggningsdelar driftsätts allteftersom de byggs klart och installationer kommer på plats. De verksamheter som planeras under olika skeden sammanfattas för respektive anläggning i avsnitt 2.3.2 till 2.3.5. De milstolpar som anges i figur 2-5 avser leveranstillfällen för resultat från teknikutveckling, det vill säga tidpunkter när teknikkomponenter och lösningar ska finnas färdiga att tas i bruk eller ha nått en viss utvecklingsfas, se kapitel 10.

Under de närmaste åren kommer SKB att successivt förbereda organisationen för byggstart av Kärnbränsleförvaret och Clink. Byggstart för Kärnbränsleförvaret är 2019 och för Clink 2021 för att anläggningarna ska kunna tas i drift samtidigt 2029. Varje större steg i arbetet föregås av en beslutsgrind som syftar till att utvärdera programmet ur ett helhetsperspektiv och lägga fast en mer detaljerad plan för perioden fram till nästa beslutsgrind.

Under pågående tillståndsprövning anpassas arbetstakten till de kompletteringar som SKB behöver utföra samt den nya information som kommer i form av yttranden från myndigheter. De viktigaste milstolparna som verksamheten kopplar till är:

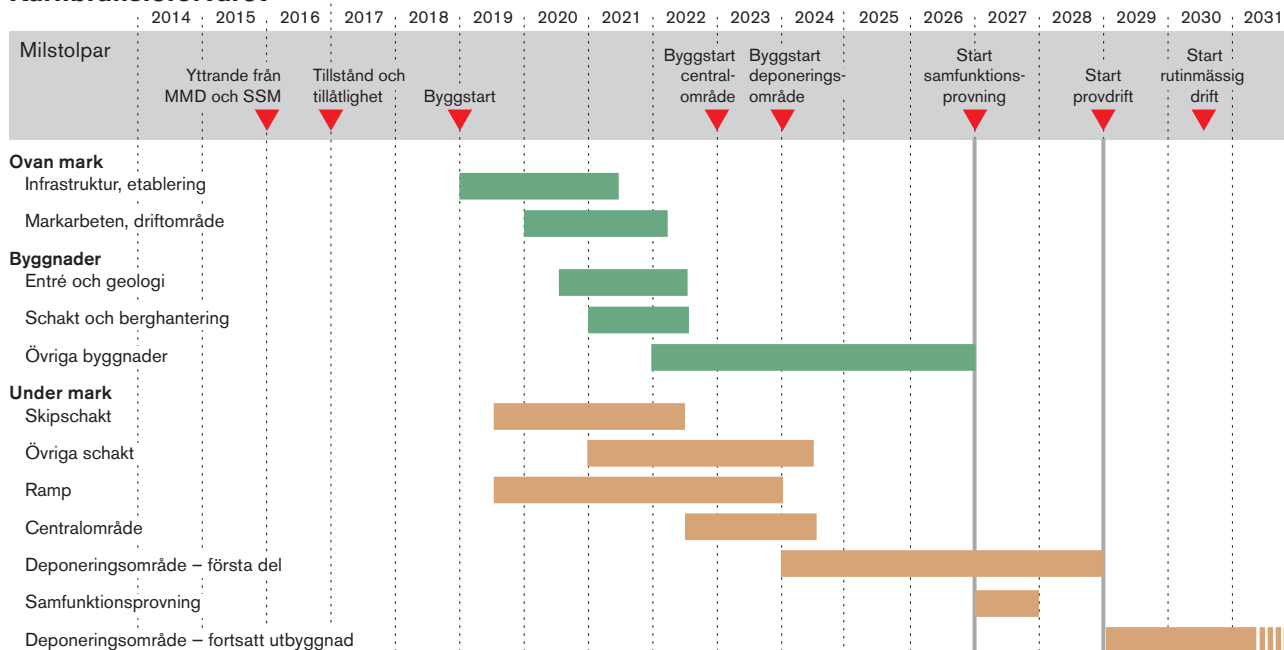
- Mark- och miljödomstolens och SSM:s yttranden till regeringen,
- regeringens beslut om tillstånd och tillåtlighet.

I och med att ovanstående milstolpar passeras ökar SKB takten i förberedelsearbetet. Ett omfattande arbete avseende detaljprojektering av anläggningsdelar och tekniska system kommer till exempel att inledas efter regeringens beslut om tillstånd och tillåtlighet.

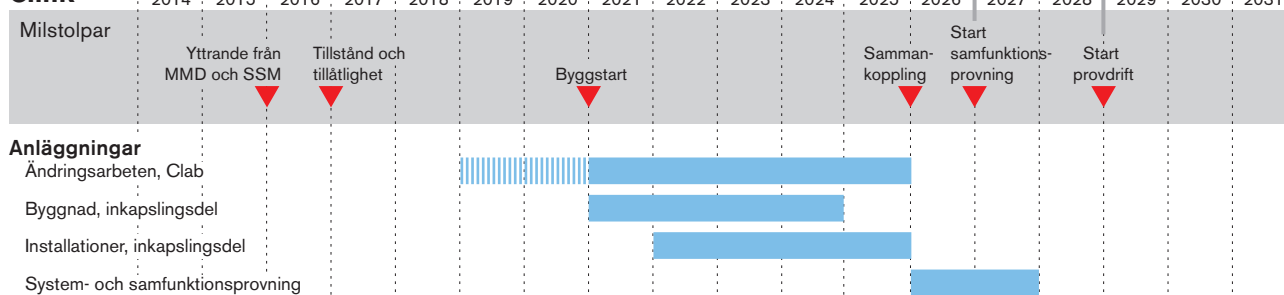
Huvudskeden



Kärnbränsleförvaret



Clink



Figur 2-5. Tidsplan för etablering av Kärnbränsleförvaret och Clink. Teknikutveckling som behövs till angivna milstolpar redovisas i kapitel 10. Notera att tidsplanen endast anger aktiviteter avseende etablering, ett omfattande detaljprojekteringsarbete kommer att inledas efter regeringens beslut om tillstånd och tillåtlighet.

Innan uppförandet av anläggningarna kan inledas ska två dokument lämnas in och godkännas av SSM:

- den preliminära säkerhetsredovisningen (PSAR) som även omfattar en beskrivning av utbyggnaden av förvarets deponeringsområden och hur denna påverkar säkerheten,
- ett särskilt dokument (Suus) som redovisar hur uppförandet av anläggningen påverkar säkerheten under drift och efter förslutning.

De dokument som lämnas in till SSM ska ta hänsyn till resultat av bland annat teknikutveckling och projektering som skett sedan ansökningarna sammanställdes. Anläggningsprojekten ska vid denna tidpunkt vara färdiga med detaljprojektering och förfrågningsunderlag på de första anläggningsdelarna som ska byggas. Organisationen ska vara redo att slutföra upphandlingar och påbörja arbeten på plats.

2.3.2 Mellanlagring

Utökning av lagringskapacitet

SKB:s tillstånd för Clab omfattar i dag mellanlagring av 8 000 ton bränsle. Enligt dagens prognoser beräknas denna mängd uppnås cirka 2023. Eftersom utlastning av bränsle från förvaringsbassängerna kan påbörjas först 2029 kommer SKB att ansöka om att öka Clabs tillåtna lagringskapacitet. SKB planerar att lämna in en sådan ansökan till SSM cirka 2018. Beslut behövs därefter från både SSM och regeringen. Innan ansökan lämnas in kommer SKB att utreda vad en utökning av lagringskapaciteten innebär för anläggningen. Förvaringsbassängerna rymmer cirka 11 000 ton bränsle. Vilken kapacitet som SKB slutligen väljer att ansöka om är ännu inte bestämt.

För att kunna ta emot bränsle för mellanlagring fram till utlastning påbörjas behöver åtgärder genomföras för att utnyttja det befintliga lagringsutrymmet mer effektivt. Dels kan bränslet och styrstavarna lagras tätare, dels finns möjligheten att mellanlagra hårdkomponenter och styrstavar torrt, se även avsnitt 3.3. En utredning avseende möjliga åtgärder planeras under den kommande Fud-perioden.

Uppgradering av befintlig anläggning

Clab närmar sig 30 års drifttid och uppgraderingar av system och utbyten av komponenter kommer att bli nödvändigt i framtiden.

Ett antal projekt pågår redan i dag. Bland annat pågår en uppgradering av kylkedjan för att få ökad kylkapacitet och redundans, byte av brandvattenrör från galvaniserade stålrör till rostfritt material samt installation av en membranfiltreringsanläggning för en förbättrad rening av utsläppsvatten. Nya kompacktkassetter är beställda och är nu under tillverkning.

En inventering av systemen på Clab har påbörjats för att undersöka behovet av förbättringar på längre sikt. Redan i dag finns ett antal förbättringsprojekt inplanerade. Här ingår bland annat en modernisering och uppgradering av bränslehissen och anläggningsanpassningar för hantering av nya transportbehållare för bränsle. Ytterligare ändringar som övervägs är nya inmatningsvägar för elkraftsförörjning och modernisering av huvudtraverser. Planering och genomförande av ändringsarbetena i Clab kommer att ske integrerat med planering och uppförande av den nya anläggningsdelen för inkapsling.

2.3.3 Inkapsling

Ansökan enligt kärntekniklagen om att få uppföra inkapslingsanläggningen och att få inneha och driva den som en integrerad anläggning med Clab lämnades in 2006. Efter SSM:s inledande bedömning meddelade myndigheten att ansökan behövde kompletteras och att Clab och inkapslingsanläggningen skulle betraktas som en anläggning, Clink. SKB redovisade sådana kompletteringar i oktober 2009. I mars 2011 kompletterade SKB sin ansökan enligt KTL avseende Clink och ansökte samtidigt om tillstånd dels enligt KTL för Kärnbränsleförvaret, dels enligt miljöbalken för hela slutförvarssystemet, innefattande Clink och Kärnbränsleförvaret.

Den teknikutveckling som pågår och planeras avser främst processerna kring hanteringen av det använda kärnbränslet, tillverkning av komponenter till kapseln samt förslutningssvetsning och oförstörande provning av komponenter och förslutningssvets. Detta redovisas i kapitel 10, 11 och 12.

Tillståndsprovning

Projektering, uppförande och driftsättning av Clink kommer att bedrivas i SKB:s regi inom projekt Clink.

Hur den kärntekniska strålsäkerheten i anläggningen Clink kommer att upprätthållas framgår av den så kallade förberedande preliminära säkerhetsredovisningen (F-PSAR) för anläggningen som lämnades in i samband med ansökan. SKB kommer också att lämna kompletterande underlag till myndigheten under provningen. Anläggningens utformning och hur kraven uppfylls kommer stegvis att förtydligas och detaljeras i takt med att teknikutvecklingen drivs framåt samt synpunkter inkommer från myndigheten under tillståndsprovningen.

Under tillståndsprövningen samt tiden fram till start av uppförandet av inkapslingsdelen kommer SKB att projektera Clink samt upphandla uppförandet. Denna fas kallas för projekterings- och upphandlingsfasen i projektet och kommer att vara indelad i fyra delvis överlappande delfaser; anläggningskonfiguration, systemkonstruktion, detaljkonstruktion och upphandling av uppförande.

Under anläggningskonfigurationsfasen avser SKB att uppdatera kravbilden för Clink utifrån krav som identifierats under teknikutvecklingen och utifrån synpunkter från myndigheten under tillståndsprövningen samt vid behov justera anläggningens preliminära layout.

SKB avser därefter att gå vidare med systemkonstruktion av Clink. Den ytterligare detaljeringen av konstruktion och verksamhet som sker i samband med detta kommer att redovisas i en PSAR för den integrerade anläggningen Clink. SKB kommer därefter att upprätta en projektplan för uppförande av inkapslingsdelen samt ändringar i mellanlagringsdelen.

När SSM godkänt PSAR för Clink kommer SKB att fortsätta detaljkonstruktionen och genomföra de upphandlingar som krävs för att påbörja uppförandet av inkapslingsdelen samt genomförandet av de ändringar som behöver göras på mellanlagringsdelen. SKB kommer också att meddela de ändringar som behöver göras på mellanlagringsdelen i form av så kallade ändringsärenden i enlighet med kraven i SSMFS 2008:1.

Arbetet under detaljkonstruktionen ska ge underlag för upphandling av anläggning och system och även förbereda uppförandet, organisatoriskt och administrativt. När SKB beviljats tillstånd går upphandlingsfasen in i ett slutskede, och uppförandeskedet tar sin början.

Uppförande

Uppförandeskedet börjar när SKB fått alla tillstånd och villkor som behövs för att påbörja bygget av inkapslingsdelen. Det innebär bland annat att en PSAR ska ha lämnats in och godkänts av SSM.

Uppförandet kommer att indelas i två parallella delar, en för ändringsarbeten i befintligt Clab och en för uppförandet av den nya inkapslingsdelen.

I Clab kommer de anläggningsändringar som behövs i form av installationer och byggåtgärder att genomföras. Parallellt kommer berg-, bygg- och installationsarbeten för inkapslingsdelen att utföras.

Driften av Clab kommer att fortgå under hela uppförandet av inkapslingsdelen. Detta medför att entreprenaderna måste anpassas så att säkerheten i Clab kan upprätthållas och störningarna på driften minimeras. Utbyggnaden av Clab, etapp 2, genomfördes på liknande sätt och erfarenheterna därifrån är ett viktigt underlag när inkapslingsdelen projekteras och byggs.

Uppförandefasen kommer att avslutas i och med att de båda anläggningsdelarna kopplas samman fysiskt och processtekniskt. Detta sker genom att väggar mellan mellanlagringsdelen och inkapslingsdelen öppnas samt att installationerna i de båda anläggningsdelarna sammankopplas och samprovas.

Driftsättning

I samband med att anläggningsdelarna kopplas samman kommer inledande tester av driften att genomföras. Använt kärnbränsle kommer att tas emot för mellanlagring under hela driftsättningen av Clink. Detta medför att driftsättningen av Clink måste anpassas så att säkerheten i mellanlagringsdelen kan upprätthållas och störningarna på driften minimeras.

De inledande testerna av driften kommer bestå av tre faser; provning och driftsättning av enskilda system, samfunktionsprovning av Clink samt samfunktionsprovning av hela KBS-3-systemet.

Samfunktionsprovning av Clink innebär att anläggningens funktion provas genom att testköra hela inkapslingsprocessen utan använt kärnbränsle, det vill säga med attrapper av bränsleelement och kopparkapslar. Samfunktionsprovning av KBS-3-systemet innebär att Clink provas tillsammans med transportsystemet och Kärnbränsleförvaret.

SKB planerar att ansöka om att få inleda provdrift av Clink årsskiftet 2027/2028. Provdriften antas starta ett år senare. Ansökan om rutinmässig drift planeras att lämnas in vid årsskiftet 2029/2030 och tillstånd för den väntas till halvårsskiftet 2030.

Produktionssystem för kapslar

SKB:s produktionssystem för kapslar ska säkerställa den långsiktiga försörjningen av kapslar till Clink inför driftstart av Kärnbränsleförvaret. Produktionssystemet för kapslar kommer att omfatta ett antal externa leverantörer som tillverkar segjärnsinsatser och kopparkomponenter till kapslarna enligt SKB:s specifikationer. SKB planerar att uppföra och driva en kapselfabrik där den slutgiltiga maskinbearbetningen, monteringen och kvalitetssäkringen av kapselkomponenter ska göras. Resultatet blir en kapsel som levereras till Clink. Försörjningen ska vara säker och kostnadseffektiv samt vara dimensionerad för att kunna försörja SKB:s behov av kapslar under förväntad drifttid.

Kapselfabriken kommer inte att vara en kärnteknisk anläggning eftersom använt kärnbränsle inte kommer att hanteras i anläggningen. Verksamheten kommer att bestå av mekanisk bearbetning av kapselkomponenter, provning mot fastställda kriterier samt montering av kapselkomponenter. Arbetet med kapselfabriken är i ett tidigt stadium jämfört med Kärnbränsleförvaret och Clink. Anledningen till detta är att tidsplanen för uppförande och driftsättning för den är väsentligt kortare än för de övriga anläggningarna i KBS-3-systemet. En förstudie som bland annat beskriver fabrikens funktioner, layout och maskinpark har nyligen avrapporterats. Ett av syftena med förstudien var att uppdatera tidigare utredningar och klargöra strategiska ställningstaganden rörande bland annat avgränsning mot externa leverantörer och omfattning av kapselproduktionens kvalitetsarbete.

Under 2013 har Posiva och SKB fördjupat sitt samarbete avseende teknikutveckling. En av de frågor som diskuteras är att skapa förutsättningar för att driva kapselfabriken gemensamt vilket skulle kunna ge samordningsfördelar i framtiden.

2.3.4 Transporter

Transportsystemet kommer att kompletteras med en ny typ av transportbehållare för transport av inkapslat använt kärnbränsle från Clink till Kärnbränsleförvaret. Transportbehållaren benämns kapseltransportbehållare (KTB). Den kommer, på grund av aktivitetsinnehållet, att vara certifierad enligt IAEA:s transportrekommendationer (nu gällande, SSR-6 2012) som förpackningstyp Typ B.

År 2005 genomfördes förstudier av tänkbara transportbehållare för kopparkapslar med internationella leverantörer. Under 2013 planeras en uppdatering/komplettering av de tidigare studierna som tar hänsyn till nya myndighetskrav och förändrade förutsättningar i SKB:s system. Den nya förstudien ska ge underlag till systemkonstruktion av inkapslingsdelen av Clink och Kärnbränsleförvaret samt utgöra underlag till kommande upphandling av KTB.

Konstruktionen av transportbehållaren tas fram i samarbete med den leverantör som kommer att väljas. Utformningen görs i en iterativ process med fokus på att uppfylla myndigheternas krav samt SKB:s egna förutsättningar, specifika krav och önskemål. Behållarens konstruktion och säkerhetstekniska egenskaper redovisas i en säkerhetsrapport som underlag för att erhålla en licens av behörig myndighet i det land den tillverkas. Innan behållaren får användas i Sverige ska en validering av licensen erhållas av SSM.

Tidsåtgång för konstruktion och licensieringsprocessen samt tillverkning uppskattas till 3,5 år respektive 1,5 år. Kapseltransportbehållaren ska sedan testas tillsammans med Clink och Kärnbränsleförvaret före driftstart.

Första behållaren ska levereras till Clink och Kärnbränsleförvaret inför provningen av enskilda system. Denna provning kan med dagens tidsplan påbörjas cirka 2025. De inledande systemvisa testerna kommer att genomföras ett år innan samfunktionsprovningen av hela KBS-3-systemet genomförs. Resterande behållare planeras att tillverkas och levereras successivt under åren 2027–2030, parallellt med samfunktionsprovning och provdrift.

2.3.5 Kärnbränsleförvaret

Tillståndsprövning

En huvuduppgift för projekt Kärnbränsleförvaret under den period tillståndsprövningen pågår är att, i ett tempo som är anpassat till tillståndsprövningens framdrift, göra alla de förberedelser som krävs för att påbörja uppförandet av Kärnbränsleförvaret. Uppförandeskedet kommer att ställa andra krav än dagens på SKB:s organisation och verksamhet. Det gäller exempelvis styrning av projektet baserat på informationsflödet mellan byggarbeten och undersökningar, modellering, projektering och säkerhetsanalys. En central uppgift på plats i Forsmark blir att fortsätta uppbyggnaden av en organisation som är anpassad för detta.

Under tillståndsprövningen pågår även arbeten avseende slutförvarsanläggningens påverkan på den yttre miljön. Här ingår det pågående arbetet med att skapa en ny levnadsmiljö för gölgrodan som i dag lever i en göl som kommer att behöva fyllas igen vid uppförandet av anläggningen. Fyra nya gölar har skapats dit grodorna ska flyttas. SKB har ansökt om artskyddsdispens hos Länsstyrelsen i Uppsala i detta ärende. Den av länsstyrelsen beviljade dispensen har överklagats.

Även anläggningens eventuella påverkan på vattennivåerna i omgivande våtmarker utreds och möjliga åtgärder för att upprätthålla vattennivåerna utvärderas baserat på praktiska försök.

Parallellt med tillståndsprövningen projekteras slutförvarsanläggningen, i nuläget pågår slutfasen av systemprojektering av slutförvarets anläggningsdelar och tekniska system. Avsikten är att detta projekteringssteg ska ligga till grund för fortsatt anläggningsutveckling följt av detaljprojektering. Denna ska i sin tur resultera i bygghandlingar och underlag för upphandling. Detaljprojekteringen görs inte för hela anläggningen samtidigt, utan i den takt underlag behövs för upphandlingar och byggarbeten. Under pågående tillståndsprövning detaljprojekteras därför i första hand anläggningsdelar som ska byggas tidigt. Det är framför allt tillfarter till förvaret, det vill säga ramp och schakt, och delar av de markförlagda anläggningarna. För delar som ska byggas senare, exempelvis deponeringsområden, görs detaljprojekteringen under byggskedet och delvis som en del av själva byggprocessen.

Byggtekniska och ingenjörsgelogiska undersökningar planeras som stöd för projekteringen före byggstart. Markundersökningar kommer att göras som underlag för placering av byggnader och dimensionering av grundläggning. Även yt nära berg kommer att undersökas, bland annat i planerade lägen för tillfarter. Den lokala infrastrukturen för anläggningarna kommer att förberedas. Det handlar i stor utsträckning om att i samarbete med Forsmarks Kraftgrupp AB anpassa den infrastruktur som redan finns i Forsmark så att även slutförvarsanläggningens behov kan tillgodoses.

Uppförande

Uppförandeskedet börjar när SKB fått alla tillstånd och villkor som behövs för att påbörja bygget av slutförvarsanläggningen. Det innebär bland annat att en preliminär säkerhetsredovisning (PSAR) ska ha lämnats in och godkänts av SSM. Uppförandet blir det mest arbetsintensiva skedet i hela slutförvarsprojektet. Höga krav kommer att ställas på väl fungerande styrning och inarbetade arbetsprocesser.

Uppförandet av undermarksanläggningarna kan indelas i tre överlappande etapper – den första när tillfarter (schakt och ramp) drivs ner till förvarsnivån, den andra när centralområdets bergutrymmen byggs och den tredje när ett första deponeringsområde etableras. Bygget av tillfarterna är tidskritiskt för hela projektets framdrift. Rampen och det första schaktet sprängs ut parallellt, från ytan och nedåt. Fram till dess att schaktet nått förvarsnivån är bergarbetena begränsade till dessa två fronter. När förvarsnivån nått startar utsprängningen av centralområdet med en berglaststation. När berglaststationen och berguppfordringen till ytan via berghissen (skipen) kan tas i drift ökar kapaciteten i berghanteringen radikalt och flera drivningsfronter kan successivt etableras. Bergarbetena för tillfarter och centralområde åtföljs av montagearbeten för den utrustning som behövs för driften av anläggningen.

Drivningen av tillfarterna och centralområdet kommer att ge fördjupade kunskaper om bergförhållandena och erfarenheter som måste kunna tas tillvara och omsättas i exempelvis insatser av bergförstärkning och tätning i tunnlar eller förändrad förvarsutformning. En arbetsmetodik som medger effektiv erfarenhetsåterföring är därför nödvändig, en sådan metodik beskrevs i bilaga VU i ansökan enligt kärntekniklagen (SKBdoc 1199888).

Parallellt med utbyggnaden av centralområdet görs undersökningar för det första deponeringsområdet och en tunnel drivs som ger tillträde till detta område. Från tunneln drivs ett fåtal deponeringstunnlar där deponeringshål borrar. Syftet med att färdigställa ett deponeringsområde i detta tidiga skede är dels att samla de geovetenskapliga data som behövs för att underbygga en förnyad säkerhetsredovisning inför provdrift, dels att skapa utrymme för implementering av hanteringsteknik för deponering och samfunktionsprovning av hela processen under driftsättningsskedet. När driften sedan inleds ska området användas för deponering av de första kapslarna med använt kärnbränsle. Utbyggnaden omfattas därför av alla tekniska och administrativa krav och kontroller som kommer att gälla för driften. För genomförande av detaljprojektering behövs även resultat och underlag från teknikutveckling, se kapitel 10.

Anläggningarna ovan mark byggs i en takt som anpassas till undermarksarbetena. I första skedet görs utfyllnader av delar av driftområdet, hanteringsytor görs i ordning och byggprovisorier etableras. De första permanenta byggnaderna som uppförs är en entrébyggnad för rampnedfarten och en byggnad som behövs för undersökningsverksamheten (geologibygnad). Senare tillkommer schaktöverbyggnader, anläggningar för berghantering, produktionsbyggnad för buffert och återfyllning, och i slutskedet övriga byggnader för drift och service.

Driftsättning

Driftsättningen av slutförvarets delsystem startar successivt, i takt med att systemen byggs klart och installeras. Tidsmässigt kommer uppförande- och driftsättningsskedena att överlappa varandra. Exempelvis kommer uppföringssystemet för bergmassor (berglaststation, skipschakt med mera) att tas i drift innan de första deponeringstunnlarna är byggda.

Vid driftsättningen provas systemen, först vart och ett för sig och sedan gradvis mera sammankopplade. Samtidigt som anläggningens delar driftsätts byggs driftorganisationen upp, och personalen utbildas och tränas för sina uppgifter. Intrimningen av teknik och organisation avslutas med samfunktionsprovning av Kärnbränsleförvaret, som innebär att hela anläggningen provas under driftsmässiga förhållanden. Då genomförs alla moment i verksamheten, inklusive deponering av ett antal kapslar, utan innehåll av använt kärnbränsle. Deponeringen sker i det första deponeringsområdet som byggts under senare delen av uppförandeskedet. Slutligen genomförs en samfunktionsprovning av KBS-3-systemet som innebär att Kärnbränsleförvaret provas tillsammans med Clink och transportsystemet.

Driftsättningsskedet avslutas när SKB får tillstånd för provdrift av slutförvarssystemet. Alla funktioner och resurser samt utrymmen för deponering ska då finnas tillgängliga så att provdriften kan inledas.

SKB planerar att ansöka om att få inleda provdrift av Kärnbränsleförvaret årsskiftet 2027/2028. Provdriften antas starta ett år senare. Ansökan om rutinmässig drift planeras att lämnas in vid årsskiftet 2029/2030 och tillstånd för den väntas till halvårsskiftet 2030.

3 Flexibilitet vid ändrade förutsättningar

SKB:s planering baseras på de antaganden som i dag gäller för det nuvarande kärnkraftsprogrammet, se avsnitt 1.1.4. Genomförandet av kärnavfallsprogrammet planeras utifrån de strategiska utgångspunkter som i dag bedöms vara de mest realistiska. Den aktuella tidshorisonten är cirka 70 år, varför SKB måste räkna med att det med tiden uppstår ändringar av planeringsförutsättningarna och att det kan göras omvärderingar av de nuvarande utgångspunkterna för planeringen.

Det kommer således att ställas stora krav på anpassningar till ändringar av förutsättningarna för programmen. Ofta är det möjligt att beakta sådana ändringar genom smärre modifieringar av programmen utan större ändringar av den långsiktiga tidsplanen. Men det finns givetvis alltid en gräns när ändringarna blir så omfattande att de ställer krav på påtagliga och omfattande åtgärder, exempelvis krav på ytterligare anläggningar eller anläggningsdelar, ändringar av layouten för ett slutförvar, kortare eller längre provningstider än tidigare beräknade, och så vidare.

Verksamheten medger en förhållandevis stor flexibilitet med avseende på ändrade förutsättningar. Nedan redovisas mycket översiktligt programmens flexibilitet och begränsningar vid ett antal specifika ändringar av förutsättningarna.

3.1 Kärnkraftsreaktorernas drifttider

SKB:s planering baseras på att reaktorerna i Forsmark, Oskarshamn och Ringhals 3 och 4 drivs i 60 år, medan Ringhals 1 och 2 drivs i 50 år. Detta innebär att de sista reaktorerna ställs av cirka 2045. Eventuella förändringar av dessa antagna drifttider innebär ändrade planeringsförutsättningar för kärnavfallsprogrammet.

En förlängning av reaktorernas beräknade drifttider innebär en ökad mängd av såväl driftavfall som använt kärnbränsle, och leder därför till krav på en ökad kapacitet för förvarssystemen. Förlängda drifttider innebär också att SKB:s anläggningar utnyttjas under längre tid.

För programmet för använt kärnbränsle motsvarar nuvarande planeringsförutsättningar slutdeponering av cirka 6 300 kapslar. En förlängd drifttid med ett år för en reaktor innebär att ytterligare 10–30 ton använt kärnbränsle ska mellanlagras och att ytterligare 5–15 kapslar ska slutförvaras. Volymen beror bland annat på reaktorns storlek och drifttid under året. När lagringsbehov för den utökade mängden bränsle uppkommer beräknas utlastning ha påbörjats från Clink så att utrymme finns för detta bränsle. Enligt aktuell planering påbörjas utlastningen 2029. Dagens planerade slutförvarskapacitet bedöms kunna ökas genom att bättre utnyttja deponeringsområdet och genom att utnyttjade områden på det valda förvarsdjupet tas i anspråk. Det är inte heller uteslutet att bergvolymer utanför dem som nu beräknas att kunna användas, kan vara lämpliga för deponering.

En förlängd drifttid innebär också ett större behov av att slutförvara kortlivat driftavfall. För närvarande pågår planeringen av en utbyggnad av SFR. Dimensioneringen bygger på gällande driftplaner för kärnkraftsreaktorerna, men med ett visst osäkerhetspåslag som skulle kunna utnyttjas för ett ökat behov av förvarsutrymme. Skulle de förlängda drifttiderna bli av större omfattning, och därmed ge upphov till ett ytterligare ökat utrymmesbehov i SFR, kan detta sannolikt tillhandahållas genom ytterligare utbyggnad av förvarsområdet.

En förlängd drifttid leder vidare till att den tidpunkt när reaktorn ställs av och nedmontering och rivning kan inledas skjuts framåt i tiden. Om drifttiden för en enstaka reaktor förlängs betyder det att behovet av deponering av avfall från nedmontering och rivning förskjuts för just denna reaktor, medan planeringen i övrigt förblir oförändrad. Om reaktorernas drifttider förlängs överlag följer en allmän tidsförskjutning av avvecklingen och behovet av förvarsutrymme för avfallet från nedmontering och rivning. De ökade mängderna kärnavfall och använt kärnbränsle medför en senareläggning av slutförvarens förslutningar. Detta skulle komma att gälla Kärnbränsleförvaret, Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall (SFR) samt Slutförvaret för långlivat avfall (SFL).

Enligt SKB:s planer kommer SFL tas i drift cirka 2045. I arbetet med SFL finns möjlighet att ta hänsyn till förändrade förutsättningar eftersom det omfattar aktiviteter i en relativt avlägsen framtid.

Omvänt skulle en förkortning av de beräknade drifttiderna för vissa reaktorer i stället innebära en minskad produktion av driftavfall och använt kärnbränsle och därför leda till ett minskat utrymmesbehov i förvarssystemen. Alla befintliga och planerade anläggningar för omhändertagande av kärnavfall och använt kärnbränsle kommer ändå att behövas. I Kärnbränsleförvaret kan då antalet deponeringspositioner minska. Om SFR redan har byggts ut till full omfattning enligt dagens prognostiserade volymer, kommer en förkortad drifttid av kärnkraftsreaktorerna sannolikt att innebära att anläggningen inte kommer att utnyttjas fullt ut.

Om reaktorernas drifttider skulle kortas överlag, följer en allmän tidigareläggning av avveckling och deponering av avfall från nedmontering och rivning. Minskade mängder kärnavfall och använt kärnbränsle innebär vidare att det totala kärnavfallsprogrammet kan avslutas tidigare. Tidsförskjutningarnas omfattning beror på hur många reaktorer som berörs och hur mycket drifttiderna förkortas.

De driftscenarier som ligger till grund för planeringen inbegriper också antaganden avseende det framtida effektuttaget i reaktorerna, bränslets utbränningsgrad samt framtida moderniseringar av kärnkraftverken. SKB:s aktuella planer bygger på de ändringar som nu planeras av kärnkraftsföretagen. Detta innebär ett ökat framtida deponeringsbehov, som nu arbetats in i aktuella planer. Underlag för framtida planering hämtas varje år in från kärnkraftsföretagen. Eventuella ytterligare effekthöjningar kan leda till ett ökat deponeringsbehov.

3.2 Drifftagning av det utbyggda SFR

Enligt nuvarande planer kommer utbyggnaden av SFR att vara klar så att deponering av avfall från nedmontering och rivning av Barsebäcksverket, Ågesta och anläggningarna på Studsviks industriområde kan påbörjas 2023. Under våren 2014 planerar SKB att lämna in ansökningar för utbyggnaden enligt miljöbalken och kärntekniklagen. Utbyggnaden planeras att kunna påbörjas i början av 2018.

Den i dag tillgängliga förvarsvolymen i SFR är inte tillräckligt stor för att rymma det kortlivade avfallet från avvecklingen av Barsebäck. Dessutom finns i dag endast tillstånd att deponera driftavfall i SFR. Planeringen för nedmontering och rivning av Barsebäck måste därför samordnas med SFR-utbyggnaden. Barsebäck Kraft AB planerar att börja avvecklingen med nedmontering av reaktorernas interna delar. Dessa komponenter är långlivade och kommer tillfälligt att mellanlagras på kraftverksområdet i väntan på transport för mellanlagring i det utbyggda SFR. På grund av förseningen med utbyggnaden av SFR utreder Barsebäck Kraft AB olika möjligheter att kunna mellanlagra det radioaktiva avfallet för att möjliggöra att nedmontering och rivning kan påbörjas innan SFR är utbyggt. I det fall mellanlagring inte går att genomföra, kommer en försening av SFR att innebära ökade kostnader till följd av förlängd servicedrift. Det finns inga negativa radiologiska konsekvenser vid en eventuell försening.

En försening av utbyggnaden av SFR kan även få konsekvenser för tidsplanen för nedmontering och rivning av Ågesta. I dagsläget utreds möjligheten att mellanlagra avfallet för att göra sig oberoende av SFR-utbyggnaden. En försening kommer även här att medföra ökade kostnader till följd av extra transporter samt eventuella mellanlager.

Av de reaktorer som är i drift kommer enligt kärnkraftsföretagens planering de första reaktorerna, Ringhals 1 och Ringhals 2, att ställas av omkring 2025–2026. I det fall SFR-utbyggnaden inte tagits i drift vid den tiden kan nedmontering och rivning av dessa reaktorer komma att försenas. Alternativt kan Ringhals AB ansöka om att tillfälligt mellanlagra avfall från nedmontering och rivning på kraftverksområdet på liknande sätt som Barsebäck Kraft AB planerar. Ringhals AB har ett särskilt förråd, kallat kokillförrådet, för mellanlagring av kortlivat och långlivat driftavfall. Förrådet har en kapacitet på cirka 10 000 kubikmeter. Enligt företagets bedömning har förrådet kapacitet för att mellanlagra reaktortanken från Ringhals 1 och stora komponenter som uppstår vid nedmontering och rivning av Ringhals anläggningar. Ett tillstånd för att mellanlagra avfall från nedmontering och rivning kommer då att behövas. Ringhals AB har även en byggnad där uttjänta ånggeneratorer har förvarats. I denna byggnad är det planerat att reaktortankarna från tryckvattenreaktorerna (PWR) ska mellanlagras i väntan på att SFR tas i drift.

Även deponering av driftavfall kommer att påverkas vid en försening av utbyggnaden av SFR. Den förvarsdel som först förväntas bli fullt utnyttjad är Bergssal för lågaktivt avfall (BLA), vilket beräknas ske redan inom ett par års tid. Innan det utbyggda SFR tas i drift kommer det lågaktiva driftavfallet att mellanlagras, till exempel på kraftverksområdena. Möjligheterna till mellanlagring är i dagsläget goda vid samtliga kraftverksanläggningar och kapaciteten bedöms som tillräcklig även vid en försening med ett par år. Marginalerna för övriga förvarsdelar i SFR är relativt stora och bedöms inte påverkas av motsvarande försening.

3.3 Drifttagning av Kärnbränsleförvaret och Clink

SKB planerar för att inleda provdrift av Kärnbränsleförvaret och Clink 2029. Detta innebär att utlastning av bränsle från mellanlagringsdelen påbörjas. Lagringskapaciteten i Clab har två begränsningar, dels tillåten mängd använt bränsle i anläggningen, dels antalet fysiska lagringspositioner i bassängerna. SKB:s tillstånd för Clab omfattar i dag 8 000 ton bränsle. Enligt dagens prognoser beräknas detta uppnås cirka 2023. SKB planerar därför att ansöka om att utöka lagringskapaciteten cirka 2018. I dag lagras förutom använt kärnbränsle även styrestavar och hårdkomponenter i Clab. Om anläggningen enbart skulle användas för mellanlagring av bränsle skulle förvaringsbassängerna kunna rymma cirka 11 000 ton bränsle.

Antalet lagringspositioner kommer enligt dagens prognoser att vara fyllda cirka 2026 om inga specifika åtgärder görs. Det finns dock ett antal möjliga åtgärder för att utnyttja det befintliga lagringsutrymmet mer effektivt. Det finns möjlighet att lasta om det bränsle som i dag lagras i normalkassetter till kompaktkassetter. Styrestavarna skulle kunna lagras tätare alternativt skulle hårdkomponenter och styrestavar kunna mellanlagras på annan plats.

Att lasta om bränsle till kompaktkassetter är en relativt enkel åtgärd och har gjorts tidigare i samband med att SKB 1992 fick tillstånd att öka Clabs lagringskapacitet från 3 000 till 5 000 ton bränsle. (Därefter har Clab byggts ut med ett andra bergtrum.) En övergång till att enbart använda kompaktkassetter skulle frigöra utrymme så att lagringskapaciteten räcker till 2029.

Olika typer av hårdkomponenter lagras i dag i Clab. Dessa består av bland annat borplåtar, bränsleboxar och olika typer av komponenter som bytts ut på kärnkraftverken. En möjlig åtgärd är att lasta om hårdkomponenterna till ståltankar (så kallade BFA-tankar) för torr mellanlagring. Ståltankar används redan i dag för mellanlagring av denna typ av avfall. Åtgärden skulle frigöra lagringsutrymme motsvarande cirka 200 ton bränsle.

I Clab lagras styrestavar från kokvattenreaktorerna (BWR) i kassetter som rymmer nio styrestavar. Styrestavarna från tryckvattenreaktorerna (PWR) är integrerade i bränslet och kräver inget extra utrymme i Clab. SKB utreder möjligheten att segmentera BWR-styrestavarna, se avsnitt 8.2.5. Syftet är att uppnå en mer kompakt mellanlagring, antingen för fortsatt våt mellanlagring i Clab eller för en torr mellanlagring i exempelvis ståltankar. I det fall styrestavarna även fortsättningsvis lagras i Clab uppskattar SKB att en sönderdelning medför att utrymmesbehovet för dessa kan halveras. En kompaktering av styrestavar skulle kunna frigöra plats för cirka 600 ton bränsle. Alternativet att mellanlagra styrestavarna torrt frigör plats för cirka 1 200 ton bränsle.

Detta ger en flexibilitet även vid en försening av drifttagningen av Kärnbränsleförvaret och Clink. Baserat på dagens prognoser kommer Clabs lagringspositioner att maximalt räcka till 2036. Detta förutsätter att hårdkomponenter och BWR-styrestavar lagras torrt samt att allt bränsle lagras i kompaktkassetter.

Om det skulle visa sig nödvändigt, finns även möjligheten att bygga ut Clab med ett tredje bergtrum med lagringsbassänger. Detta skulle bli aktuellt först vid en längre försening av programmet för använt kärnbränsle. En utbyggnad skulle sannolikt ske på liknande sätt som av Clab etapp 2, som togs i drift 2008. Om Clab utökas med ett tredje bergtrum skulle anläggningen kunna ta emot ytterligare drygt 5 000 ton bränsle. Innan SKB fattar beslut om ett eventuellt tredje bergtrum kommer även möjligheten till torr mellanlagring av bränsle att utredas. Bland annat måste aspekter avseende den långsiktiga säkerheten analyseras. Torr mellanlagring används i dag av ett flertal länder, bland annat Spanien och Tyskland.

3.4 Nya kärnkraftsreaktorer

Med en möjlighet till generationsskiften i kärnkraftsbeståndet kan det bli aktuellt att ersätta befintliga reaktorer med nya. Även om SKB:s uppdrag är begränsat till nuvarande kärnkraftsprogram, skulle uppdraget kunna vidgas och SKB:s kompetens utnyttjas även för avfall från nya reaktorer.

3.4.1 Ersättning av befintliga reaktorer av tredje generationen

Under 2012 lämnade Vattenfall AB in en ansökan till SSM om att få ersätta en eller två befintliga reaktorer med nya. Tillståndsprövningen för att uppföra och ta en ny reaktor i drift är en stegvis process som kommer att pågå under många år. Tillstånd kommer att krävas bland annat från regeringen. I det skedet kommer även en plan för avfallshanteringen att behövas.

Nya reaktorer skulle innebära att den totala volymen avfall kan bli betydligt större än vad som förutsatts. Det är i dag inte möjligt att prognostisera omfattningen av de avfallsvolymer som skulle aktualiseras genom generationsskifte av reaktorerna. Dessa volymer beror framför allt på hur framtida ekonomiska avvägningar kan påverka viljan att investera i ny kärnkraft.

Dagens tio reaktorer beräknas enligt nuvarande planering att tas ur drift under perioden 2025–2045. Om nya reaktorer fasas in i stället för dessa, innebär det nya scenariot en återstående drifttid för kärnkraften på sammantaget upp till 90 år, om de nya reaktorerna utnyttjas under 60 år.

De nya reaktorerna antas tillhöra vad som brukar kallas tredje generationens kärnkraftsreaktorer. De är i många avseenden mer tekniskt utvecklade än dagens reaktorer. Det är dock fråga om kok- eller tryckvattenreaktorer med samma grundläggande teknik som dagens reaktorer och de ger därmed samma slags restprodukter som dessa. Den relativa sammansättningen av avfallet kan bli en annan än dagens. Innehållet av radioaktiva ämnen i det använda kärnbränslet beror till exempel på vilken typ av bränsle som används, driftförhållandena och bränslets avklingningstid. Sammansättningen och fördelningen mellan de kort- och långlivade ämnena styrs av utbränningsgraden och den så kallade specifika effekten.

Volymen radioaktivt driftavfall torde bli lägre per producerad kilowattimme el än vad den första och andra generationens reaktorer lämnat efter sig. Utvecklingen har redan i dag lett till att den mängd driftavfall som tas om hand från dagens reaktorer är avsevärt mindre i förhållande till elproduktionen, än vad man räknade med när reaktorerna togs i drift. Anledningen är att kärnkraftsföretagen genom teknisk utveckling förbättrat bearbetning och kompaktering av avfallet i syfte att minimera volymerna.

Det använda kärnbränslet från de nya reaktorerna kommer att ha en högre genomsnittlig utbränning än kärnbränslet från dagens reaktorer. Detta sett över reaktorernas hela livslängd. Den högre utbränningen innebär att kärnbränslet kommer att behöva en längre tids mellanlagring innan det kan kapslas in och slutförvaras. Uppskattningsvis kommer en mellanlagring på cirka 60 år att krävas. Detta tillsammans med de nya reaktorernas långa drifttid innebär att mellanlagring och inkapsling skulle behöva pågå under en period som sträcker sig en bra bit in på 2100-talet. En översiktlig genomgång visar på att bränsleelementen i de nya reaktorerna troligen kommer att vara längre än de som används i dagens reaktorer. Clink kommer troligtvis inte kunna användas för bränslen från nya reaktorer. Nya anläggningar kommer då att behövas för både mellanlagring och inkapsling. I dag finns en väl utvecklad teknik för både våt och torr mellanlagring av använt kärnbränsle och båda teknikerna är därmed tänkbara.

Om kapaciteten i Kärnbränsleförvaret är tillräcklig även för det nya kärnbränslet är svårt att bedöma i dagsläget. För att göra detta krävs nya undersökningar. Tunnlar och schakt bedöms dock kunna hållas öppna under den tid som krävs. Ombyggnadsbehovet i Kärnbränsleförvaret bedöms vara litet. Behovet av ett nytt förvar kommer därmed troligen att styras av den tillgängliga förvarskapaciteten.

Nedan antas att samtliga dagens tio reaktorer ersätts med nya, men ett tänkbart scenario är även att enbart en del av de befintliga reaktorerna ersätts. Ersättningsreaktorernas nettoeffekt antas vara densamma som den för dagens reaktorer. För detta behövs då ett förvarsområde av samma storleksordning som det som planeras för det använda kärnbränslet från dagens reaktorer. Det torde då vara både säkerhetsmässigt och ekonomiskt mest fördelaktigt att förlägga de nya förvarsområdena

i anslutning till Kärnbränsleförvaret. Fördelarna ligger dels i goda kunskaper om berggrunden runt förvaret, varför behovet av nya undersökningar kan reduceras, dels i att ovanmarksanläggningar samt ramp och schakt kan användas också för det tillkommande förvarsområdet. För att möta det ökade deponeringsbehovet kan SKB utreda och undersöka möjligheten att bygga ett plan till i Kärnbränsleförvaret. Detta möjliggör att det övre planet kan förslutas efter denna generations kärnkraftverk, medan driften av det undre planet tar vid.

Vidare innebär ett scenario med ersättningsreaktorer ett tillkommande behov av förvarskapacitet för driftavfall av i det närmaste samma omfattning som SFR med nu planerad utbyggnad. Byggande av ytterligare slutförvarsutrymmen kan ske i anslutning till SFR, om berggrunden kan anses lämplig, eller som en separat anläggning på annan plats.

Behov kommer också att uppkomma av ytterligare förvarskapacitet i Slutförvaret för långlivat avfall, SFL. Byggandet av SFL skulle behöva påbörjas i stort sett enligt nu gällande planer för att ta hand om avfall från dagens reaktorer, men anläggningen behöver hållas i drift under en längre tid.

3.4.2 Framtida snabba reaktorer av fjärde generationen

Utveckling pågår på olika håll i världen av snabba reaktorer. Dessa har potential att utnyttja uranresursen betydligt bättre (50–100 gånger) än lättvattenreaktorer. Mycket utvecklingsarbete återstår såväl på reaktortekniken som på den tillhörande bränslecykeln och snabba reaktorer bedöms inte finnas tillgängliga för kommersiell drift i större skala förrän under andra halvan av detta århundrade.

Snabba reaktorer har en annan typ av bränslecykel som skulle kunna påverka det svenska kärnavfallsprogrammet på flera sätt:

- En del av det använda kärnbränslet sparas för att starta ett snabbreaktorprogram², parallellt med att Kärnbränsleförvaret drivs vidare för huvuddelen av det använda bränslet.
- Kärnbränsleförvaret utformas så att avfall från upparbetning av det befintliga bränslet och nytt bränsle från snabba reaktorer kan slutförvaras.
- Då snabba reaktorer kräver upparbetning så kommer nya avfallsströmmar att skapas i det svenska systemet. Till följd av upparbetningen uppkommer högaktivt förglasat avfall och nya typer av låg- och medelaktivt avfall. Dessutom uppkommer betydande mängder långlivat neutroninducerat avfall från reaktorhärden (SFL-avfall).

SKB:s bedömning är att utvecklingen av snabba reaktorer inte påverkar arbetet med Kärnbränsleförvaret. Det främsta skälet till detta är att även om snabba reaktorer skulle komma i kommersiell drift i större skala omkring 2050 finns det vid detta tillfälle en så stor mängd plutonium tillgängligt i använt bränsle runt omkring i världen att huvuddelen av det använda bränslet alltså behöver slutförvaras.

² Plutonium från lättvattenreaktorbränsle kommer endast att behövas för de första årens drift av en snabbreaktor. Denna genererar därefter sitt eget plutonium från utarmat uran som tillförs reaktorn.

Del II

Låg- och medelaktivt avfall

- 4 Hantering av låg- och medelaktivt avfall
- 5 Utbyggnad av Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall
- 6 Slutförvar för långlivat avfall
- 7 Markförvar
- 8 Teknikutveckling för slutförvaring av låg- och medelaktivt avfall
- 9 Ansvar, planering och teknik för avveckling av kärntekniska anläggningar

4 Hantering av låg- och medelaktivt avfall

På de kärntekniska anläggningarna i Sverige uppstår låg- och medelaktivt avfall i form av driftavfall och i framtiden även avfall från nedmontering och rivning. SKB arbetar tillsammans med avfallsproducenterna för att på ett tillfredsställande sätt omhänderta det låg- och medelaktiva avfallet. För att kunna hantera och lagra radioaktivt avfall är det nödvändigt att kategorisera det utifrån både radionuklidernas halveringstid och aktivitetsinnehållet vilket redogörs för i avsnitt 1.1.4 Det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet.

I del II av Fud-programmet behandlas såväl det befintliga som det planerade omhändertagandet av låg- och medelaktivt avfall som uppstår i samband med drift och avveckling av de kärntekniska anläggningarna i Sverige. I detta arbete utgör erfarenheter från driften av det befintliga Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall (SFR) en nödvändig kunskapsgrund för utvecklingen och upprättandet av nya slutförvarsanläggningar för låg- och medelaktivt avfall. Den övergripande planeringen för arbetet med detta redovisas som en del av företagets planering i avsnitt 2.2.

Hantering av det befintliga kortlivade respektive långlivade låg- och medelaktiva avfallet samt program för den utveckling som SKB driver inom området redogörs för i detta kapitel. Där beskrivs även driften av SFR och den utveckling som sker och planeras på anläggningen samt teknik- och metodutveckling som bedrivs av avfallsproducenterna.

Vad det planerade omhändertagandet av låg- och medelaktivt avfall omfattar beskrivs i de följande kapitlen 5 till 9. Arbetet med utbyggnaden av SFR för att förvaret ska inrymma allt kortlivat avfall som uppstår vid drift och avveckling av de kärntekniska anläggningarna beskrivs i kapitel 5. Nuläge och planerade aktiviteter för det framtida Slutförvaret för långlivat avfall (SFL) redovisas i kapitel 6 som också innefattar en redovisning av avfallsmängderna och när i tiden de förväntas uppkomma. Avfall med mycket låg aktivitet hanteras i dagsläget av kärnkraftföretagen själva. SKB utreder om markförvar kan utgöra ett alternativ för delar av avfallet från avvecklingen, detta behandlas i kapitel 7. Den teknikutveckling som bedrivs för att utveckla nya slutförvarslösningar för låg- och medelaktivt avfall, men även den utveckling som behövs för att upprätthålla och säkerställa funktionerna hos befintligt SFR redovisas i kapitel 8. En beskrivning av ansvarsfördelning, planering och teknik för avveckling av kärntekniska anläggningar finns i kapitel 9. Den naturvetenskapliga forskningen som berör det låg- och medelaktiva avfallet redovisas i del IV av Fud-programmet.

4.1 Hantering av kortlivat låg- och medelaktivt avfall

De svenska avfallsproducenterna har under senare år arbetat med att på olika sätt reducera utsläpp av radioaktiva ämnen till omgivningen. Till exempel genom förbättrad teknik för rening av luft och vatten samt reduktion av utsläpp av förorenat vatten. Detta kan till mängd och nuklidinnehåll påverka det kortlivade låg- och medelaktiva avfallet som uppstår. Innan avfallet transporteras till slutförvarsanläggningen behandlas det hos avfallsproducenterna. Förutom att förpacka avfallet kan syftet med behandlingen vara att reducera volymen eller modifiera de fysikaliska och kemiska egenskaperna. För att avfall ska kunna deponeras krävs att det finns en av SSM (Strålsäkerhetsmyndigheten) godkänd typbeskrivning för avfallet. Deponeringsregler för avfall som placeras i SFR redogörs för i avsnitt 4.3.1.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 redogjordes översiktligt för etablerade tekniker samt program för att rena vatten och konditionera avfall.

SSM påpekade i sina kommentarer till Fud-program 2010 att metoder som inte är inarbetade bör redogöras för mer utförligt. De påtalade vidare att det är angeläget att arbetet med att åstadkomma utsläppsreduceringar inte avstannar och att metoder för att omhänderta och slutförvara avfallet utvecklas.

SSM ansåg att SKB och avfallsproducenterna på ett tydligt sätt bör visa vilka åtgärder som vidtas för att så långt som rimligen är möjligt minska avfallsmängderna.

4.1.1 Uppkomst av kortlivat låg- och medelaktivt avfall

Tekniker som i varierande omfattning utnyttjas i dag av de olika avfallsproducenterna för att rena utsläppsvatten är filtrering, jonbyte, indunstning, membranfiltrering och centrifugering. För att minska luftutsläpp finns exempel där kolkolonner används. Verksamheten med att rena vatten och luft ger upphov till driftavfall i form av bland annat filter, jonbytarmassor och indunstarkoncentrat.

Program

Ringhals AB (RAB) arbetar sedan en tid tillbaka med att driftsätta en indunstare. Indunstaren har testkörts och efter att lagringsutrymmet för indunstarkoncentrat utökats ska den tas i kontinuerlig drift. För att nå högre halt torrsubstans på indunstarkoncentratet ska en vakuumindestare användas som ett sekundärt reningssteg. Borhalten får inte bli för hög i indunstarkoncentratet, varför RAB i dag undersöker möjligheten att förbehandla borhaltigt dränagevatten från tryckvattenreaktorerna med en tryckdriven membranfilteranläggning. Tester för utprovning av lämpligt membran för boravskiljning har påbörjats.

Planer finns även på att använda tryckdriven membranteknik på Clab (Centralt mellanlager för använt kärnbränsle) och OKG Aktiebolag (OKG). På Clab pågår konstruktionen av en membran-anläggning för rening av avfallsvatten innehållande en blandning av radioaktiva silvernuklider och organiskt material. På OKG installerades en testrigg under våren 2013 där membran av typen ultrafilter testas för rening av vatten från golvdänage. Tester förväntas pågå i cirka 1,5 år varefter beslut kan fattas om tekniken ska införas eller inte.

Forsmarks Kraftgrupp AB (FKA) har sedan många år använt indunstare för att rena utsläppsvatten. Problem med vattenlösliga radionuklider i ångfasen har gjort att man i dag tittar på möjligheten att komplettera indunstaren med en cesiumselektiv jonbytare samt att utöka kapaciteten och effektiviteten på indunstaren. Utvärdering av den cesiumselektiva jonbytaren förväntas leda till beslut om eventuellt införande. Förstudie och provprogram för indunstaren pågår, där bland annat olika drift-parametrar ska testas, och beslut om åtgärder förväntas kunna fattas under kommande Fud-period.

Slutligen planerar SVAFO att utveckla reningstekniken för utsläppsvatten genom att bygga en vakuumindestare. I dag blandas lågaktivt vätskeformigt avfall från Studvik Nuclear AB och SVAFO. Rening sker med tillsats av järnklorid och efterföljande sedimentering där slammet från sedimenteringen gjuts in i kampanjer. Införandet av en vakuumindestare kommer förutom att sänka aktivitetsnivån i utsläppsvatten, även göra att lågaktivt vätskeformigt avfall från SVAFO inte behöver renas tillsammans med lågaktivt avfallsvatten från Studsvik Nuclear AB.

4.1.2 Reducering av kortlivat låg- och medelaktivt avfall

Avfallsproducenterna arbetar löpande med att minska avfallsvolymer genom att reducera flödet av material in på kontrollerad sida och genom att friklassa och källsortera material. I respektive anläggnings avfallsplan ingår friklassning och generellt finns interna rutiner hos respektive avfallsproducent för att säkerställa att verksamheten friklassar så stora mängder material som möjligt, efter att ekonomiska och miljömässiga aspekter beaktats. Miljöfarliga ämnen friklassas i regel alltid för att möjliggöra lämpligt omhändertagande.

Om avfallet har mycket lågt innehåll av radioaktiva ämnen men inte är friklassningsbart, kan det vara aktuellt att placera det i ett markförvar. Detta är ett sätt att minska avfallsmängderna i SFR och kan principiellt ses som en "fördröjd friklassning". Avfall som placeras i markförvar ligger aktivitetsmässigt generellt mellan kategorierna friklassningsbart och avfall som placeras i BLA (Bergssal för lågaktivt avfall) i SFR.

Varje markdeponi har ett angivet år då aktivitetsmängden i deponin ska vara så låg att den understiger gränsen för friklassning, något som konkretiseras i form av radionuklidspecifika gränsvärden. Vidare finns för varje markdeponi krav på avfallskollinas högsta ytdosrat på 0,5 millisievert per timme (mSv/h), och en gräns för högsta tillåtna totala aktivitetsinnehåll i deponin. Deponering sker enbart i form av deponeringskampanjer där avfallsproducenten ansöker och anmäler om deponering till SSM respektive länsstyrelsen.

Program

För att möta dagens krav på låg bakgrundsstrålning vid mätningar för friklassning tänker både RAB och OKG placera friklassningsverksamheten i en egen byggnad eller del av en byggnad och köpa in ny mätutrustning. På OKG har en byggnadsdel redan anpassats för ändamålet och mätutrustning köpts in. RAB har planer på att införa dekontaminering för friklassning med tvätt och blästring i en separat byggnad. Även FKA undersöker möjligheten till en separat byggnad för friklassning med lägre bakgrundsstrålning, vilket skulle innebära kortare mättider. Barsebäck Kraft AB (BKAB) utför i nuläget enbart friklassning på verktyg och utrustning samt spillolja i egen regi och har tecknat avtal med Studsvik Nuclear AB för övrigt material. BKAB planerar att på sikt bygga upp egen kompetens för att kunna friklassa material i större omfattning på den egna anläggningen. SVAFO konstruerar en mobil mätstation för friklassning, som ska kunna förflyttas mellan olika anläggningar för friklassningsmätningar.

För att öka kunskapen i branschen inom området dekontaminering pågår ett arbete med att sammanställa nationella och internationella erfarenheter. Arbetet ska resultera i en handbok i dekontaminering och planer finns även på att ta fram en utbildning.

4.1.3 Karakterisering av kortlivat låg- och medelaktivt avfall

För att bestämma det radionuklidspecifika innehållet i avfall, används både direkta och indirekta mätmetoder samt korrelationer och beräkningar. I Fud-program 2010 beskrevs ett utvecklingsarbete kring etablering av metoder för mätning av nickel-63. Arbetet har resulterat i att FKA och OKG analyserar nickel-63 med hjälp av vätskescintillation efter en provberedning med dubbel fastfasextraktion. Utbytesbestämning görs genom att analysera stabilt nickel och andelen interfererande radionuklider bestäms med gammasppektrometri. En annan metod bestående av provberedning i form av separation med jonkromatografi och efterföljande analys av nickel-63 med vätskescintillation omnämns i Fud-program 2010. Denna metod används av RAB, men metoden är på väg att överges till förmån för den metod som nu används av FKA och OKG. RAB har köpt in den metod för analys av nickel-63 som FKA och OKG använder. Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI) arbetar på uppdrag av RAB med att certifiera och driftsätta metoden så att den även ska kunna tillämpas på borhaltigt vatten.

4.1.4 Konditionering av kortlivat låg- och medelaktivt avfall

Metoder som i varierande omfattning utnyttjas av de olika avfallsproducenterna för att konditionera avfall är bland annat cement- och bitumensolidifiering och betongkringgjutning. Dessa metoder kan ibland föregås av exempelvis förbränning, sönderdelning och behandling med UV-ljus för att bryta ned organiskt material. För att reducera avfallsvolymer och utnyttja kapaciteten hos jonbyttarmassan bättre, har RAB och OKG rutiner för att återanvända jonbyttarmassa från kondensatreningen till att rena vatten från golvdränage.

Program

Avfallsproducenterna arbetar med olika utvecklingsprojekt i syfte att omhänderta tillkommande avfallsströmmar på ett bra sätt.

RAB utför försök med elektrokemisk nedbrytning av indunstarkoncentrat för att minska andelen komplexbildare i koncentratet. Arbetet pågår nu för att optimera metoden. RAB har även arbetat med att minska innehållet av komplexbildare i avfallet genom att byta ut en del tvål och rengöringsmedel mot produkter med mindre andel komplexbildare. Behovet av elektrokemisk nedbrytning av vatten från golvdränage har därför minskat, men kvarstår för vissa dekontamineringslösningar. Planen är att slutligen gjuta in indunstarkoncentratet i cement i betongkokiller och en typbeskrivning för avfallet tas nu fram.

FKA:s försök med plasmeförbränning av indunstarkoncentrat som beskrevs i Fud-program 2010 har lagts ner.

För att bättre utnyttja volymen i kokiller arbetar OKG med att införa plåtkokiller i stället för betongkokiller. Med ett byte till plåtkokiller kan volymutnyttjandet öka med 70 procent.

4.2 Hantering av långlivat låg- och medelaktivt avfall

4.2.1 Långlivat låg- och medelaktivt avfall

Det långlivade låg- och medelaktiva avfallet utgörs huvudsakligen av fem kategorier:

- Kraftigt neutronbestrålad hårdkomponenter. Avfallet uppkommer både vid underhåll och vid nedmontering och rivning av reaktorer.
- Styrstavar från BWR-reaktorer. Styrstavar förbrukas under driften av reaktorer.
- Reaktortankar från PWR-reaktorer. Avfallet uppkommer vid nedmontering och rivning av reaktorer. Kan komma att hanteras med hårdkomponenter och interndelar kvar i tanken.
- Långlivat avfall från Studsvik Nuclears verksamheter samt från sjukvård, forskning och industri. Detta avfall uppkommer successivt och är inte knutet till driften eller avvecklingen av kärnkraftverken.
- Historiskt avfall från forskning och utveckling inom de svenska forskningsprogrammen för kärnkraft. Detta avfall hanteras och mellanlagras av SVAFO.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 redovisade SKB uppdaterade prognoser för när i tiden det långlivade låg- och medelaktiva avfallet uppkommer. Den totala volymen angavs till 10 000 kubikmeter konditionerat avfall. Den mellanlagrade mängden avfall, som angavs till cirka 6 000 kubikmeter, utgörs i huvudsak av historiskt avfall som hanteras och mellanlagras av SVAFO. SKB visade hur mängden avfall ökar med tiden utifrån den aktuella planeringen för byte av hårdkomponenter och demontering av reaktorer.

SSM ansåg att den presenterade prognosen svarade mot den redovisning som de begärt i samband med kompletteringen av Fud-program 2007. SSM konstaterar att runt 60 procent av avfallet redan producerats, medan det övriga avfallet enligt nuvarande planer förväntas uppkomma när kärnkraftsreaktorerna rivs under 2030- och 2040-talen.

Nuläge

Arbetet med det uppdaterade referensinventariet för SFL redovisas i avsnitt 6.4.

4.2.2 Mellanlager för långlivat avfall

Långlivat avfall mellanlagras i dag antingen i Clabs bassänger, i kärnkraftverkens egna förvaringsbassänger eller torrt i behållare (i huvudsak ståltankar) i olika mellanlager på kraftverken.

Historiskt avfall hanteras av SVAFO och mellanlagras, liksom avfall från Studsvik Nuclears verksamhet samt från sjukvård, forskning och industri, i mellanlager på SVAFO:s och Studsvik Nuclears områden.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 redovisade SKB kapaciteten i de befintliga mellanlagren (förvarsbassänger på kärnkraftverken och i Clab ej inräknade). Deras sammanlagda volym överstiger klart den planerade totala deponeringsvolymen för allt långlivat låg- och medelaktivt avfall som ska slutförvaras i SFL. SKB redovisade även planerna på att ansöka om att få mellanlagra långlivat avfall i SFR. Genom att möjliggöra mellanlagring av långlivat avfall i SFR säkerställer SKB att det finns mellanlagringsutrymme både före och efter det att kärnkraftverken avvecklats och även när anläggningsområdena används för andra ändamål.

SSM hade inga större invändningar i sak mot SKB:s analys och redovisning av mellanlagringen av långlivat avfall i SFR. SSM kommer inte att ta slutlig ställning till denna möjlighet förrän i samband med prövningen av ansökan om utbyggnad av SFR.

Nuläge

SKB har inom ramen för projekt SFR-utbyggnad utrett förutsättningarna för ett mellanlager för långlivat avfall från kärnkraftverken i det utbyggda SFR. Utredningen har resulterat i att SKB planerar för att kunna inleda mellanlagring av långlivat avfall i SFR i samband med att driften av den utbyggda anläggningen inleds. Detaljerna kommer att redovisas i de kommande ansökningarna för att bygga ut SFR. SKB undersöker också möjligheten till mellanlagring av långlivat avfall från kärnkraftverken på annan plats än i SFR.

4.3 SFR – Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall

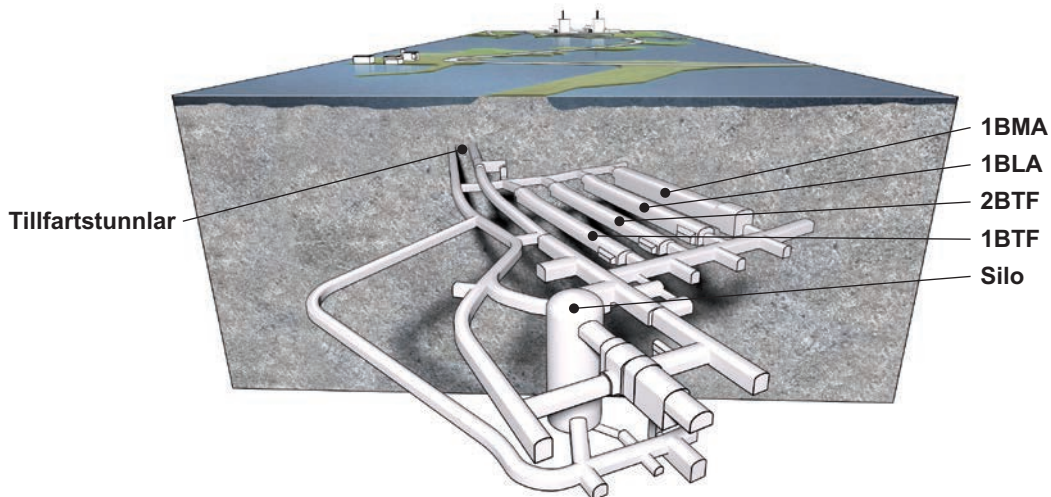
Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall är en bergrumsanläggning i Forsmark med cirka 60 meter bergtäckning som nås via tillfartstunnlar från markytan. Förvaret är uppdelat i olika förvarsdelar, vilka har utformats med hänsyn till det avfall som ska placeras i dem, se figur 4-1. SFR har varit i drift sedan 1988 och drivs sedan 1 juli 2009 av SKB.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 presenterade SKB de generella principerna för fördelning av avfall till olika delar av SFR samt det arbete som pågår eller planeras för att förlänga drifttiden för SFR. I samband med att ansökningarna om en utbyggnad av SFR lämnas in, kommer också en plan att lämnas in för hur anläggningen med sin planerade utbyggnad utnyttjas på bästa sätt.

SSM ställde sig positiv till den översyn av SFR som beskrevs i Fud-program 2010. I kommentarerna framkom även att de ansåg att en översyn av reglerna för styrning av avfall till olika delar av SFR bör breddas och även inkludera andra typer av slutförvar såsom markförvar och SFL. I detta arbete borde det även ingå en översyn av möjligheterna att, så långt som rimligen är möjligt, minimera avfallsmängderna.

SSM belyste slutligen att ett förbättringsbehov finns avseende spårbarheten för individuella avfallskollin och olika versioner av typbeskrivningar samt fördelningen av aktinider i SFR.



Figur 4-1. Översikt över SFR-anläggningen med tillfartstunnlar och de olika förvarsdelarna utmärkta: Silo och BMA för det medelaktiva avfallet med mest aktivitet. BTF-förvaren för medelaktivt avfall med lägre aktivitetsnivåer och BLA för lågaktivt avfall. (BMA – Bergssal för medelaktivt avfall, BTF – Betongtankförvar, BLA – Bergssal för lågaktivt avfall.)

4.3.1 Drift av anläggningen

Under 2012 tog SKB fram nya acceptanskriterier för avfall i SFR. Acceptanskriterierna är en del av säkerhetsredovisningen för SFR och ska ge en samlad bild över de krav som ställs på avfallet och säkerställa avfallets egenskaper vid deponering.

Att acceptanskriterierna för avfallet uppfylls ska säkerställas genom de verifieringar som föreskrivs i typbeskrivningarna. Dessutom ska verifieringar göras i samband med transport, där kontroll av avfallet samt av avfallskollits avfallsdata utförs. På SFR görs en visuell kontroll att identiteten av mottaget avfall stämmer med den som är angiven i transportdokumentationen. Därutöver genomför SKB avfallsrevisioner hos avfallsproducenterna.

Reglerna för fördelningen av avfallet mellan de olika förvarsdelarna i SFR bygger på acceptanskriterierna och följer principerna bästa möjliga teknik (BAT, Best Available Technique) och ALARA (As Low As Reasonably Achievable).

De övergripande kraven på avfall som deponeras i SFR är:

- Avfallskollin ska inte ge upphov till oacceptabel spridning av radionuklider under drift eller efter förslutning.
- Avfallskollin ska kunna hanteras utan oacceptabel påverkan av joniserande strålning till människa och miljö.

Det är i första hand avfallets egenskaper och ursprung som är styrande för i vilken förvarsdel det ska deponeras. Ett etablerat ledningssystem finns inom SKB med rutiner för granskning av avfallsdata och typbeskrivningar samt för hantering av avfall som ska till SFR. Deponeringsregler och acceptanskriterier för avfall som ska till olika förvarsdelar framgår av SFR:s säkerhetsredovisning och SKB:s avfallshandbok för låg- och medelaktivt avfall. I tabell 4-1 finns en redovisning av de generella principerna.

Utöver radionuklidinnehållet och materialet i sig beror avfallets egenskaper vid förslutning även på miljön i SFR och eventuell kringgjutning. De drift- och deponeringsrutiner som finns i SFR, exempelvis rutiner för kringgjutning, reglerar därmed avfallets egenskaper vid förslutning.

För erfarenhetsåterföring inom avfallsområdet finns ett etablerat forum (Loma-gruppen) som består av representanter från samtliga avfallsproducenter och avdelningen för låg- och medelaktivt avfall på SKB. Syftet med forumet är att informera och att utreda frågor som rör låg- och medelaktivt avfall.

Program

Sedan 2012 finns en samarbetsgrupp för avfall från nedmontering och rivning: Typbeskrivningsgruppen för rivningsavfall. Gruppen, där samtliga avfallsproducenter är representerade, ska ta fram gemensamma strategier för hantering av typbeskrivningar för avfall från nedmontering och rivning.

I samband med ansökningarna om en utbyggnad av SFR görs en säkerhetsanalys som visar om placeringen av avfall i både den befintliga och utbyggda delen av SFR är långsiktigt säker. Baserat på säkerhetsanalysen inför drifttagning av det utbyggda SFR görs en bedömning om en justering av den planerade deponeringsstrategin ytterligare kan öka förvarets säkerhet. SKB har också för avsikt att se över hur lågaktivt avfall från nedmontering och rivning kan styras till markförvar enligt beskrivningen i kapitel 7 samt att arbeta vidare med acceptanskriterier för SFL, vilket behandlas i avsnitt 6.5.

4.3.2 Underhåll

När SFR byggdes var avsikten att anläggningen skulle ta emot kortlivat låg- och medelaktivt avfall fram till och med 2010. Nu planeras kärnkraftverken att drivas under längre tid än vad som planerades när SFR byggdes. Detta medför att SFR:s driftskede kommer att pågå under längre tid än vad som ursprungligen avsågs, vilket ställer nya krav på underhållet av anläggningen.

Säkerheten, oavsett driftskedets längd, bygger på anläggningens grundkonstruktion, användningen av robusta och beprövade system och komponenter samt ett underhållsprogram. Underhållsprogrammet inkluderar förutom avhjälpan och förebyggande underhåll, ett program för identifiering, hantering och förebyggande av åldersrelaterade försämringar och skador.

Under våren 2012 slutfördes en utredning om SFR-anläggningen vars syfte var att kartlägga status på dess system. Utredningen omfattade områdena el, bygg, mekanik och VVS och resulterade i handlingsplaner för respektive område samt en handlingsplan för området brand, som initialt inte ingick i utredningen. I dessa handlingsplaner beskrivs åtgärder som rangordnas efter hur viktigt objektet eller systemfunktionen är med avseende på drift, personsäkerhet och anläggningens tillgänglighet.

Tabell 4-1 Generella deponeringsregler för avfall till SFR.

Avfallstyp	Avfallets fördelning mellan förvarsdelarna			
	BLA	BTF	BMA	Silo
	Övergripande dosratskrav för avfallskollin i de olika förvarsdelarna			
	< 2 mSv/h	< 10 mSv/h	< 100 mSv/h (20 % > 30 mSv/h)	< 500 mSv/h
Jonbytarmassor och filterhjälpmedel från BWR-reaktorer	Efter särskild bedömning i undantagsfall	System 332, 342 Lågaktiva kokiller efter särskild bedömning	System 332, 342 Efter särskild bedömning system 324, 331	System 331, 324 och även mindre aktiva system tillåtliga
Jonbytarmassor och filterhjälpmedel från PWR-reaktorer och olika system	Efter särskild prövning i undantagsfall	Lågaktiva betongkokiller efter särskild bedömning	System 417, 330, 342, 334, 324, 336 efter särskild bedömning	System 417, 330, 334, 336, 337, 342, 324
Jonbytarmassor och filterhjälpmedel från Clab	–	–	–	System 313, 324, 371, 372
Slam, torkat sediment	Torkat sediment efter särskild bedömning	Slam i betongtankar	Torkat sediment i sopor och skrotkokiller	–
Indunstarkoncentrat från BWR- och PWR-reaktorer	–	–	Koncentrat som härrör från olika dränagesystem	–
Jonbytarmassor etc producerade på SVAFO	–	–	Efter särskild bedömning slam från vattenrening	Äldre avfall från Ågesta, R2 med mera, efter särskild prövning
Sopor och skrot från BWR	I normala fall sopor och skrot från mellanbyggnad, avfallsbyggnad, turbin- och generatorbyggnad. Efter bedömning även avfall från reaktorbyggnad. Sorteras på dosratskriterier och mäts nuklidspecifikt	–	I normala fall sopor och skrot från reaktorbyggnad och turbin. Sorteras på dosratskriterier och mäts nuklidspecifikt	Skrot med höga dosrater och högt nuklidinnehåll efter bedömning
Sopor och skrot från PWR	I normala fall sopor från reaktorbyggnad. Sorteras efter dosratskriterier och mäts nuklidspecifikt	–	I normala fall sopor och skrot från reaktorbyggnad. Sorteras efter dosratskriterier och mäts nuklidspecifikt	Skrot med höga dosrater och högt nuklidinnehåll efter bedömning
Sopor och skrot från Clab	–	–	Normala sopor och skrot	Skrot och filterpatroner
Aska producerad på Studsvik Nuclear	–	Askor från förbränning av sopor	Askor från förbränning av sopor	–
Sopor och skrot producerade på Studsvik Nuclear och SVAFO	Lågaktivt skrot från R2, HCL, ACL, avfallsanläggning, avvecklade anläggningar, sjukhus, institutioner, ABB Atom (Westinghouse Electric Sweden), kärnkraftverk	–	Medelaktivt skrot från R2, HCL, ACL, avfallsanläggning, avvecklade anläggningar, sjukhus, institutioner, ABB Atom (Westinghouse Electric Sweden), kärnkraftverk	Brandvarnare innehållande americium-241

Förklaringar: 313 – Kyl- och reningssystem för mottagningsbassänger, 324 – Kyl- och reningssystem för bassänger, 330 – Allmänt för kemi- och reningssystem, 331 – Reningssystem för reaktorvatten, 332 – Kondensatreningssystem med precoatfilter, 334 – Kemi- och volymkontrollsystem, 336 – Kemiprovtagningsystem, 337 – Bottenblåsningssystem, 342 – System för vätskeformigt aktivt avfall, 371 – Rening av processvatten, 372 – Rening av golvdrenagevatten, 417 – Bottenblåsningssystem, R2 – Reaktor 2, HCL – Hot-cell-laboratoriet, ACL – Aktiva centrallaboratoriet.

4.3.3 Informationshantering vid mellanlagring och deponering

SKB och avfallsproducenterna har system för registrering och rapportering av radioaktivt avfall, enligt SSM:s krav på informationshantering. Tidigare har varje organisation haft egna informationshanteringssystem. Ett nytt verktyg, Gadd, håller nu på att utvecklas för att fungera som en gemensam databas för kärnkraftverken och SKB. Systemet utvecklas i första hand för att användas av SKB och OKG varefter även BKAB, FKA och RAB kommer att inkluderas. Studsvik Nuclear och SVAFO ingår i dagsläget inte i planerna för Gadd. SKB ansvarar för utvecklingen och förvaltningen av den nya databasen.

I en första version av Gadd kan OKG och SKB administrera information om det låg- och medelaktiva kortlivade avfallet. För avfall som skickas till SFR finns funktioner för hanteringen av transport och deponering. Den gemensamma databasen underlättar informationshanteringen mellan de olika organisationerna. Information om avfall som levereras till SFR från organisationer som inte använder Gadd, hanteras genom att en avfallsdatafil med kollininformation läses in i Gadd-systemet. Dataöverföringen sker innan avfallet transporteras till SFR och alla data måste godkännas av SKB innan en transport får genomföras.

Vid deponeringen i SFR kompletteras databasen med uppgifter om när och var enskilda kollin deponeras. I Gadd finns, jämfört med tidigare databasen Triumf, en 3D-visualisering av de deponerade kollina i silon och BMA.

Till driftsättningen av Gadd kommer data, från de databaser som ersatts, att migreras och verifieras för att säkerställa att alla data som tidigare funnits fortfarande omhändertas och inte har förvanskats.

För sammanställning av avfallsdata, samt uppskattning av volym-, material- och aktivitetsinnehåll i SFR, används beräkningsfunktioner som är inkluderade i Gadd. SKB:s tidigare beräkningsverktyg, Triumf NG, är ett fristående system som kräver årlig överföring av data från databasen Triumf. En förbättring i och med Gadd är att migrering inte längre är nödvändig då beräkningsmodulen är inkluderad i databasen. Registrering av underlag för prognoser och icke kollibundna data hanteras manuellt som i Triumf NG, men nu med bättre användarvänlighet. Efter kommentarer från SSM angående hanteringen av icke kollibundna data har beräkningsmetoderna för att fördela aktivitet över avfallet i SFR vidareutvecklats så att de även inkluderar avfall som är mellanlagrat hos avfallsproducenterna.

Program

Efter en första driftsättning av Gadd kommer utvecklingen att fortgå så att även BKAB, FKA och RAB kan anslutas till databasen. Funktioner för SKB och OKG kommer att utökas och förfinas. Enligt krav från SSM ska SKB hantera spårbarhet mellan individuella avfallskollin och olika versioner av typbeskrivningar, vilket kommer att införas på ett tydligare sätt när alla kärnkraftföretagen omfattas av Gadd.

I en senare version av Gadd väntas databasen även hantera information om det avfall som uppstår vid nedmontering och rivning av de svenska kärntekniska anläggningarna samt avfall som klassificeras som långlivat låg- och medelaktivt och som avses att deponeras i det framtida SFL.

5 Utbyggnad av Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall

I detta kapitel redovisas SKB:s planer för utbyggnaden av SFR. Den planerade utbyggnaden innebär att anläggningens lagringskapacitet ökar med uppskattningsvis 110 000 kubikmeter samt med utrymme för nio stycken BWR-reaktortankar. SFR:s nuvarande kapacitet är cirka 63 000 kubikmeter. Syftet med redovisningen i detta kapitel är att ge en överblick av nuläget i planeringen så att tillämpningarna av resultaten från forskning, utveckling och demonstration i olika skeden kan överblickas lättare. Teknikutveckling för slutförvaring av låg- och medelaktivt avfall redovisas i avsnitt 8.1. Utförligare redogörelser av utbyggnaden och verksamheten i SFR kommer att ges i de ansökningar som lämnas in våren 2014.

Fokus för det kommande skedet är att erhålla tillstånd att uppföra och driva en utbyggd anläggning samt att genomföra detaljprojekteringen av anläggningens utformning.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Planerna för utbyggnad av SFR beskrevs i Fud-program 2010. I granskningen av programmet framförde SSM att det behöver förtydligas vilket avfall som ligger till grund för dimensionering av utbyggnaden av SFR, särskilt vad gäller avfall från anläggningarna i Studsvik. SSM ansåg också att tidsplanen behövde ses över för att tillse att det finns tillräckligt med tid för myndighetsgranskningen av de säkerhetsredovisningar som ska granskas och godkännas inför uppförande, provdrift och rutinmässig drift.

När det gäller lokaliseringen framförde SSM att de ansåg att det underlag som SKB presenterat var alltför kortfattat för att motivera att Forsmark är den bästa platsen för en lokalisering av slutförvaret för avfall från nedmontering och rivning.

5.1 Samråd

Samråd mellan SSM och SKB rörande utbyggnad av SFR har hållits vid två tillfällen under 2011, fyra tillfällen under 2012 och ytterligare samråd planeras under 2013. Vid samråden har SKB redovisat lokaliseringsfrågan, framdriften av projektering, teknikutveckling och säkerhetsredovisning. Vidare har innehåll och utformning av ansökan enligt kärntekniklagen om utbyggnad av SFR diskuterats. Vid samråden har SSM kunnat framföra synpunkter på det arbete som bedrivs för att kunna slutförvara och mellanlagra låg- och medelaktivt avfall i ett utbyggt SFR. Dessutom har SKB genomfört samråd enligt miljöbalken som en del i arbetet med att ta fram den miljökonsekvensbeskrivning som enligt miljöbalken och kärntekniklagen ska bifogas ansökningarna.

5.2 Överordnade krav på anläggningen

För befintligt SFR finns två principiella säkerhetsfunktioner: begränsning och fördröjning. Begränsning innebär att mängden tillåten aktivitet i förvaret begränsas. Fördröjning innebär att transporten av radionuklider från avfallet till biosfären ska fördröjas till dess utsläppet inte ger några radiologiska konsekvenser. SFR har således ingen absolut inneslutande funktion. För utbyggnaden av SFR gäller samma principiella säkerhetsfunktioner som för den befintliga anläggningen.

Anläggningen ska så långt det är rimligt och motiverat utformas så att risken för spridning av radioaktiva ämnen och framtida persondoser minimeras. Förvarsutrymmena ska, med hänsyn tagen till de olika typerna av avfall, utformas så att de i samverkan med avfallskollin uppfyller önskad barriärfunktion.

Utbyggnaden av SFR ska dimensioneras för att kunna omhänderta allt tillkommande kortlivat låg- och medelaktivt driftavfall samt allt kortlivat avfall från nedmontering och rivning som bedöms uppstå

vid avvecklingen av samtliga kärnkraftverk, inklusive Ågestareaktorn och forskningsreaktorerna vid Studsvik, samt vid avvecklingen av Clink (Central anläggning för hantering, mellanlagring och inkapsling av använt kärnbränsle). Vid dimensioneringen av SFR tas även hänsyn till avfall från sjukhus, forskning och industri som kommer att produceras eller som finns i anläggningarna i Studsvik.

Sammanfattningsvis ska utbyggnaden av SFR dimensioneras för:

- Allt driftavfall som uppstår under driften av kärnkraftverken (50 års drifttid för Ringhals 1 och 2 samt 60 år för Ringhals 3 och 4 och för reaktorerna i Forsmark och Oskarshamn), utom de mängder som bedöms kunna deponeras i markförvar.
- Allt kortlivat avfall från nedmontering och rivning av de befintliga kärnkraftverken, inklusive Ågesta och forskningsreaktorerna R2/R0 i Studsvik.
- Allt kortlivat driftavfall från Clab respektive Clink.
- Allt kortlivat avfall från nedmontering och rivning av Clink.
- Prognostiserade volymer avfall från Studsvik Nuclear AB och SVAFO.
- Slutförvaring av stora hela BWR-reaktortankar, utom kraftigt neutronbestrålade interndelar.

5.2.1 Mängd kortlivat driftavfall

Mängden kortlivat driftavfall som förväntas finnas deponerat i SFR vid förslutningen av anläggningen 2076 beräknas i dag till cirka 68 000 kubikmeter (SKB 2013a). Den beräknade volymen är en summering av den volym som deponerats till och med 31 december 2012 och de prognostiserade volymerna för kommande drift.

5.2.2 Mängd kortlivat avfall från nedmontering och rivning

Mängden kortlivat avfall från nedmontering och rivning som förväntas finnas deponerat i SFR vid förslutningen av anläggningen 2076 beräknas i dag till cirka 84 000 kubikmeter (SKB 2013a).

Prognosen hämtar underlag från studier för avveckling, avvecklingsplaner och prognosunderlag för de olika anläggningarna. Utöver de inventerade avfallsmängderna har en bedömning gjorts avseende mängden sekundäravfall som kan tänkas uppkomma under nedmontering och rivning.

5.2.3 Osäkerheter i avfallsvolymer

Den uppskattade mängden avfall som avses deponeras i framtiden omfattas av en rad osäkerheter. En del osäkerheter är svåra att förutse. Ändringar i lagar och politiska beslut, ändrade driftsbetingelser samt tidigare- eller senareläggning av stängningen av de olika kärnkraftverken mot vad som antas i dagsläget kan inte uteslutas.

Prognosen baseras på drifterfarenheter och kunskap kring hur kolliproduktionen har fluktuerat under tidigare driftår. För avfall från nedmontering och rivning presenteras osäkerheter i den inventerade avfallsmängden i studierna för avveckling. Utöver det inventerade avfallet, som omfattar järn/stål, betong och sand, bedöms en viss andel sekundäravfall uppkomma i samband med nedmontering och rivning.

Andra faktorer som kan påverka de framtida avfallsmängderna är i vilken utsträckning olika typer av efterbehandling görs. Detta gäller främst avfallet från nedmontering och rivning, då det i dagsläget inte finns några etablerade rutiner kring dess hantering. Exempel på detta är vilken packningsgrad som i slutändan kan åstadkommas samt om ytterligare volymreduceringar kan uppnås genom smältning av lågaktiva processsystem. Avfallsmängderna till SFR styrs även av hur friklassningsarbetet och användandet av markförvar kommer att se ut på sikt. Möjligheten att deponera det mycket lågaktiva avfallet från nedmontering och rivning i markförvar i stället för i SFR skulle innebära en avsevärt minskad avfallsvolym till BLA och utgör därmed huvudalternativet. I nuläget ingår dock allt material från nedmontering och rivning som inte friklassas och som klassas som kortlivat avfall i den dimensionerande volymen för utbyggnaden av SFR. För mycket lågaktivt driftavfall antas att fortsatt deponering i markförvar kan ske.

5.2.4 Dimensionerande avfallsvolymer

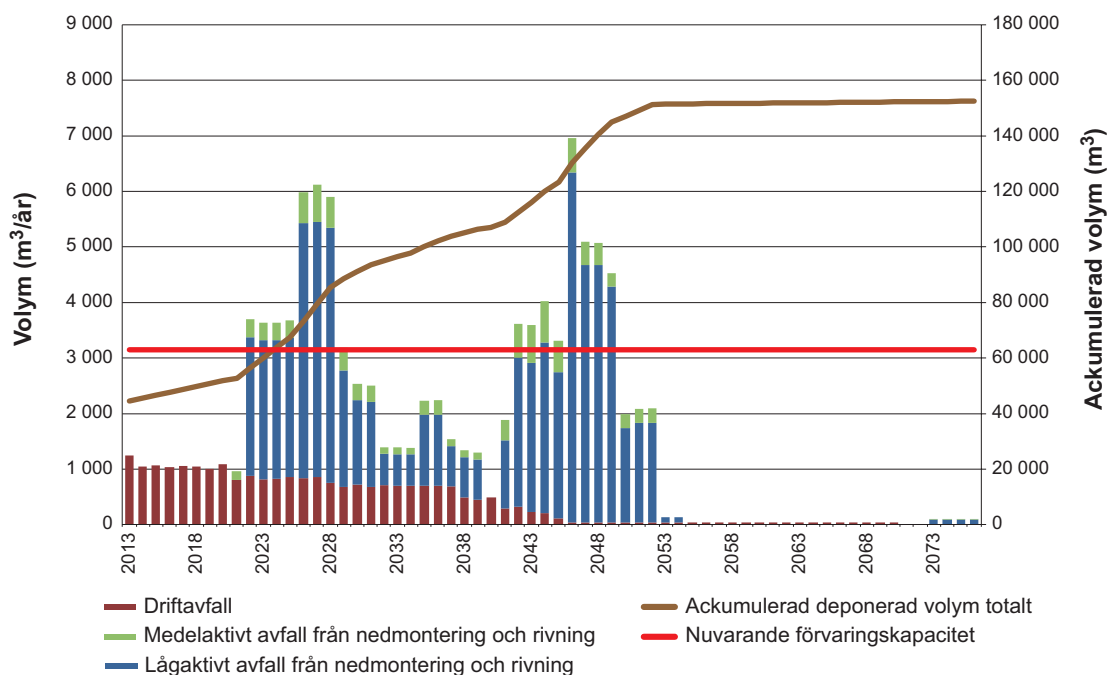
Utifrån prognoserna och de identifierade osäkerheterna har en värdering gjorts hur dessa ska ingå i dimensioneringen av utbyggnaden av SFR. Den dimensionerande avfallsvolymer för utbyggnaden av SFR har beslutats att vara cirka 110 000 kubikmeter samt med utrymme för nio BWR-reaktortankar. Beslutet baseras på en strävan efter att balansera kravet på att omhänderta allt avfall som kan uppkomma mot risken för att anläggningen överdimensioneras. I den dimensionerande avfallsvolymer ingår utöver grundprognoserna för avfall från drift samt nedmontering och rivning även cirka 15 000 kubikmeter för hantering av osäkerheter. Figur 5-1 visar resultat från den senaste prognosen av volymerna avfall från drift samt nedmontering och rivning. Det lågaktiva avfall som inte ryms i befintlig anläggning mellanlagras hos avfallsproducenterna tills utbyggd anläggning tas i drift.

5.2.5 Mellanlagring av långlivat avfall

Utbyggnaden av SFR dimensioneras för att möjliggöra mellanlagring av långlivat avfall (hårdkomponenter) från kärnkraftverken. Den största volym som mellanlagret kan behöva hantera bedöms enligt en preliminär uppskattning vara cirka 2 800 kubikmeter. Mellanlagret ska dimensioneras efter kraftföretagens behov och när i tiden SFR planeras att stå klart för att ta emot avfall. Genomförda utredningar visar att ett mellanlager i SFR är tekniskt genomförbart. I den säkerhetsredovisning som kommer att ingå i ansökningarna om utbyggnad av SFR kommer även mellanlagringen av långlivat låg- och medelaktivt avfall att behandlas som en del av verksamheten.

5.3 Acceptanskriterier för avfall i SFR

Acceptanskriterier för avfall (Waste Acceptance Criteria) i det utbyggda SFR har arbetats fram. Acceptanskriterierna sammanställs bland annat utifrån SFR:s konstruktionsförutsättningar och säkerhetsanalys, krav från nationella myndigheter samt internationella standarder och rekommendationer. De nya acceptanskriterierna har arbetats samman med kriterier som finns för befintligt SFR. Därmed finns en samlad kravbild för kortlivat låg- och medelaktivt avfall som ska slutdeponeras samt för långlivat låg- och medelaktivt avfall som ska mellanlagras i det utbyggda SFR.



Figur 5-1. Prognos för volymer kortlivat avfall från drift samt nedmontering och rivning till SFR. Den volym som uppstår under ett år läses av på den vänstra axeln. Den bruna kurvan visar den ackumulerade volymen avfall och läses av på den högra axeln (totalt cirka 155 000 m³). Ackumulerad volym kan jämföras mot den nuvarande förvaringskapaciteten (den röda linjen, totalt 63 000 m³).

5.4 Lokalisering

Inför ansökningarna om utbyggnad av SFR har en lokaliseringsutredning tagits fram (SKB 2013b). Att lokalisera ett slutförvar för kortlivat avfall från nedmontering och rivning i anslutning till SFR förefaller logiskt av många skäl, bland annat eftersom den befintliga anläggningen fungerar väl och avfallet från nedmontering och rivning är av liknande karaktär som driftavfallet.

Lagstiftningen ställer krav på redovisning av alternativ förlägningsplats för slutförvaring av kortlivat avfall från nedmontering och rivning. För att uppfylla dessa krav har SKB systematiskt jämfört olika platser med avseende på nedanstående faktorer, som kan ha betydelse för den samlade värderingen:

- Långsiktig säkerhet.
- Teknik för genomförande.
- Miljö och hälsa.
- Samhällsaspekter.

Den alternativa platsen ska, liksom den valda platsen, ha goda förutsättningar för att uppfylla krav på långsiktig radiologisk säkerhet. För att bedöma detta krävs underlag i form av geovetenskapliga data och annan information. Vidare ska platsen ge goda förutsättningar för att tekniskt uppföra och driva ett slutförvar så att etableringen ger begränsad påverkan på miljö och människors hälsa. Robusthet och effektivitet i genomförandet ska eftersträvas och kostnaderna för etablering och drift ska vara rimliga. Det ska också vara troligt att det går att uppnå samhällelig acceptans för ett slutförvar på den alternativa platsen.

Baserat på erfarenheter från säkerhetsanalysen SAR-08 (SKB 2008a) har följande plats-specifika säkerhetsrelaterade faktorer bedömts vara av betydelse för slutförvaring av kortlivat avfall från nedmontering och rivning:

- Låg vattengenomsläpplighet i berggrunden.
- Låg hydraulisk gradient.
- Reducerande förhållanden.
- Låg seismisk aktivitet.
- Avsaknad av malmpotential.
- Låg risk för brunnborrning.

Utifrån dessa krav/önskemål kan översiktliga bedömningar av långsiktig radiologisk säkerhet göras. SKB:s tidigare undersökta områden inom ramen för lokaliseringsprocessen för Kärnbränsleförvaret (här benämnda referensområden), se figur 5-2, är möjliga jämförelseobjekt, främst på grund av god tillgång på geovetenskapliga data men även därför att syftet med undersökningarna i dessa områden varit att identifiera bergvolymen lämpliga för slutförvaring.

En översiktlig genomgång av de säkerhetsrelaterade faktorerna indikerar att de flesta av referensområdena har bergförhållanden som mycket väl kan möjliggöra slutförvaring av kortlivat avfall från nedmontering och rivning. Inget av referensområdena framstår som uppenbart mest lämpligt om man bara ser till de säkerhetsrelaterade faktorerna.

Om man även väger in andra faktorer blir bilden en annan. Industriella förutsättningar saknas för flera av områdena och ur samhällelig synpunkt är det mycket tveksamt om något av referensområdena, med undantag för Simpevarp/Laxemar, är tillgängligt som alternativ plats. Flera av områdena ligger i kommuner som tackat nej till medverkan i lokaliseringsprocessen för Kärnbränsleförvaret. I andra fall kan det konstateras att de tidigare provborrningarna har mött lokalt motstånd. Möjligheterna att slutförvara avfallet från nedmontering och rivning på någon annan plats än i Forsmark (vid SFR) eller i Simpevarp/Laxemar är därför mycket osäkra. SKB:s bedömning är därför att den enda plats som är ett realistiskt alternativ till Forsmark är Simpevarp/Laxemar.



Figur 5-2. Referensområden som studerats i lokaliseringstuderingen.

Detta baseras på följande:

- Simpevarp/Laxemar har varit föremål för platsundersökning. Det finns alltså omfattande data om berggrunden som kan användas för att bedöma platsens lämplighet för slutförvaring av avfall från nedmontering och rivning.
- Simpevarp/Laxemar har goda förutsättningar för teknisk genomförbarhet med avseende på bergbyggnad samt tillgång till befintligt transportsystem och övrig infrastruktur.
- Slutförvaring vid Simpevarp/Laxemar ger begränsad påverkan på miljö och människors hälsa.
- Slutförvaring vid Simpevarp/Laxemar kan sannolikt få samhällelig acceptans.

Vid en inbördes prioritering mellan Laxemar- och Simpevarpsområdena framstår Simpevarp som det mest gynnsamma alternativet. Huvudskälen är kortare transportavstånd och mindre påverkan på natur- och kulturmiljöer för Simpevarp, samt tveksamheter vad gäller möjlighet att få tillgång till mark i Laxemarområdet. Simpevarpsområdet, vilket även inkluderar Ävrö och Hålö, bedöms därför vara en rimlig alternativ plats för slutförvaring av avfall från nedmontering och rivning.

Vid en jämförelse mellan slutförvaring av kortlivat avfall från nedmontering och rivning i en utbyggnad av SFR med alternativet att uppföra ett separat slutförvar för kortlivat avfall från nedmontering och rivning i Simpevarp, är slutsatsen att båda alternativen erbjuder potentiellt goda förutsättningar för långsiktig säkerhet. De skillnader som ändå indikeras, talar till Forsmarks fördel. Liknande slutsatser fås vid jämförelser av faktorer avseende miljö och hälsa samt samhällsaspekter.

Skillnaderna mellan de båda alternativen är störst vid jämförelser av teknisk genomförbarhet. Jämförs etablerings- och driftsaspekter framstår Forsmarks fördelar tydligt. I grunden beror det på att man där kan samla all slutförvaring av kortlivat avfall till en plats. På kort sikt ger detta tids- och kostnadsbesparingar i etableringsskedet, eftersom exempelvis driftområde och en stor del av de funktioner som krävs redan finns på plats medan ett förvar i Simpevarp kräver nyetablering av ett driftområde. Effektivitetsvinsterna med att ha en anläggning i stället för två är tydliga på lång sikt, detta beroende på de långa drifttiderna. Då tillkommer också en väsentlig fördel i form av bättre förutsättningar för långsiktig kontinuitet i verksamheten.

SKB:s huvudsats är att:

- Med den valda lokaliseringen för slutförvaring av avfall från nedmontering och rivning kan ändamålet med verksamheten uppnås med minsta intrång och olägenhet för människors hälsa och miljön.
- Ingen annan plats kan utpekats som är uppenbart bättre än den valda, och som i realiteten är tillgänglig för att kunna tas i anspråk med rimliga insatser och inom önskvärda tidsramar.

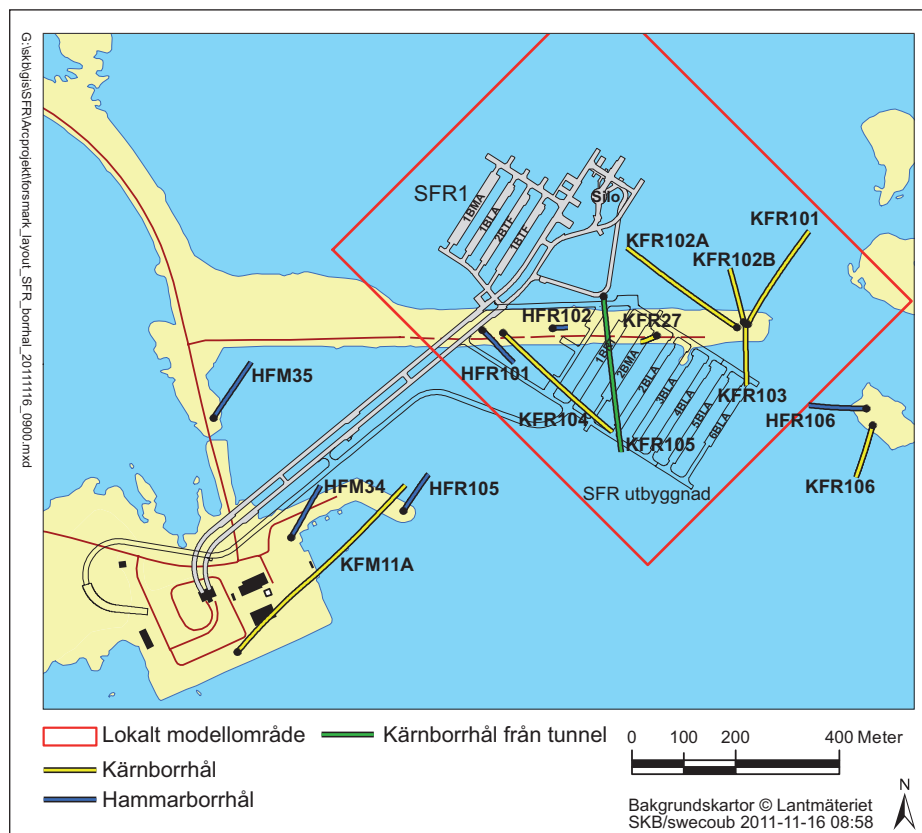
SKB planerar därför att bygga ut det befintliga SFR i Forsmark för att ta hand om det framtida låg- och medelaktiva driftavfallet samt avfall från nedmontering och rivning.

5.5 Platsundersökningar

SKB har genomfört platsundersökningar med syfte att kartlägga berget och dess egenskaper i det område i Forsmark som är aktuellt för en utbyggnad av SFR utifrån byggbarhet och långsiktig säkerhet. Målet var att undersöka en bergvolym stor nog att kunna inrymma hela utbyggnaden. Undersökningarna påbörjades 2008 och avslutades 2011.

5.5.1 Resultat från undersökningar

Vid platsundersökningens genomförande delades arbetet upp i 1) undersökningar (i fält) och 2) modellering. I och med detta har undersökningens roll ur resultatsynpunkt varit att producera primärdata och lagra dessa i en primärdatabas. Modelleringens roll har varit att producera de ämnesspecifika platsbeskrivande modellerna och upprätta den samlade platsbeskrivningen. Totalt har fyra hammarborrhål och åtta kärnborrhål borrats och undersökts, se figur 5-3. Cirka 3 000 meter borrhålsräknor har analyserats och preliminära data visar på bra bergkvalitet i området. Berggrunden består till största delen av metagranit och pegmatit med en genomsnittlig frekvens på tre till fyra öppna sprickor per meter.



Figur 5-3. Karta som visar borrhållslägen för undersökningar för utbyggnad av SFR (KFM 11A, HFM 34 och HFM 35 ingick inte i SFR:s undersökningsprogram). Figuren visar ett exempel på preliminär layout för utbyggnadens deponeringsområde.

Undersökningarna i borrhålen har omfattat Bips (Borehole Image Processing System), borrhålsradar, geofysisk borrhålsloggning (naturlig gamma, magnetisk susceptibilitet, temperatur, vätskeresistivitet, densitet etc), differensflödesloggning (spricktransmissivitet, elektrisk konduktivitet, flödesriktning etc), vattenkemiprovtagning och tryckmätning.

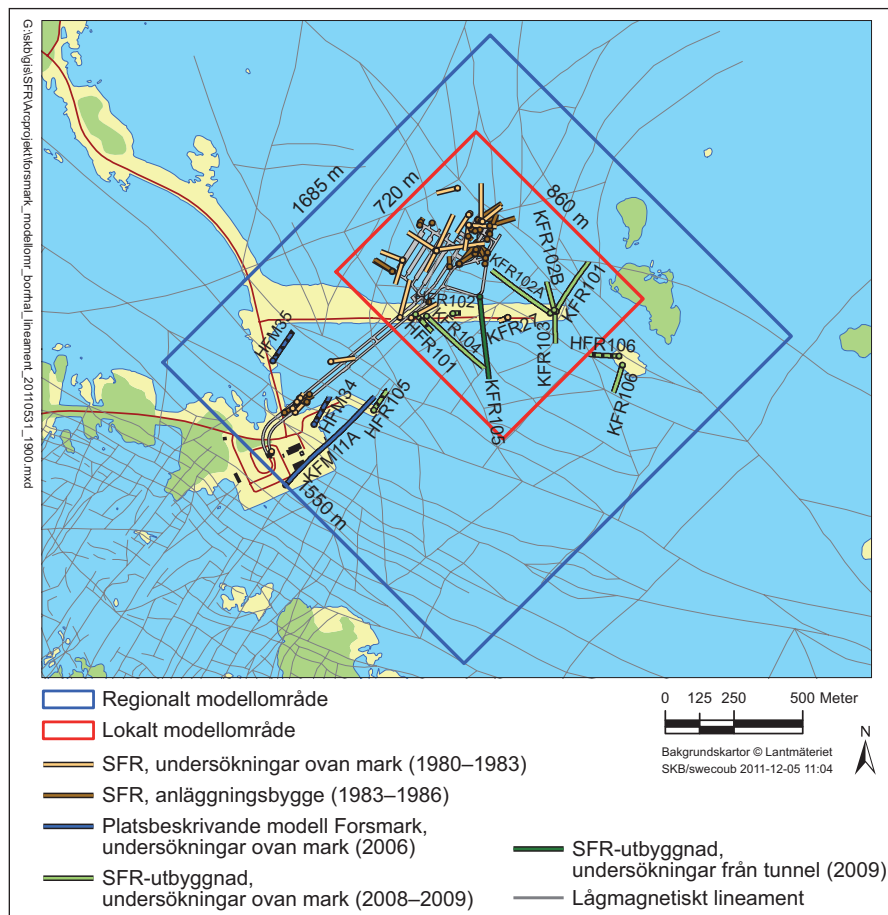
Kvalitetsarbetet för undersökningarna bygger på erfarenheter från platsundersökningarna för Kärnbränsleförvaret och har fungerat bra även i detta projekt.

5.5.2 Modellering och platsbeskrivning

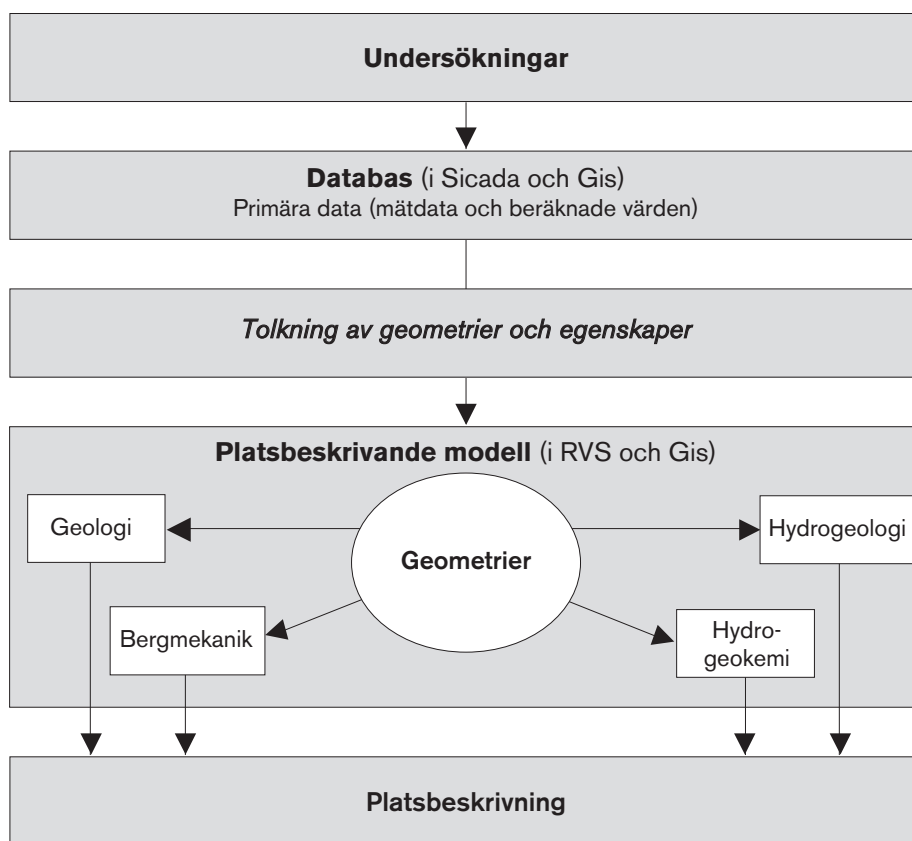
De fältundersökningar som genomfördes i undersökningsprogrammet utgör, tillsammans med tidigare gjorda undersökningar från bygget av SFR och från platsundersökningen för Kärnbränsleförvaret, underlaget till beskrivning av den undersökta platsen, se figur 5-4.

Generellt kan modelleringens projektet sägas ha omfattat kvalitetskontroll av data, utvärdering och analys av primärdata, tredimensionell modellering och rapportering. Slutresultatet är en platsbeskrivande modell, SDM-PSU (SKB 2013b) för det undersökta området. Platsbeskrivningen utgör en integrerad geovetenskaplig redogörelse för egenskaperna hos den undersökta bergvolymen och dess relation till den regionala omgivningen. Platsbeskrivningen behövs i samband med projekteringen när slutförvaret ska placeras in och utformas. Den ger också underlag för analys av slutförvarets långsiktiga säkerhet. Platsbeskrivningen är inte enbart begränsad till att beskriva försvarsplatsen utan omfattar även dess regionala omgivning i den utsträckning detta är nödvändigt för ändamålet. I den geovetenskapliga platsbeskrivande modellen finns beskrivningar av platsens geologiska, bergmekaniska, hydrogeologiska och hydrogeokemiska förhållanden.

Fyra modellversioner har lett fram till den platsbeskrivande modellen SDM-PSU (SKB 2013b). För rationell styrning strukturerades datainsamling och modellering i ämnesområden, se figur 5-5.



Figur 5-4. Karta som visar borrhål från olika tidsperioder. Kartan innehåller även det regionala modellområdet för vilket uppdaterade modeller tagits fram. Det lokala modellområdet har en högre dataintensitet som möjliggjort en högre upplösning på deformationzonsmodellen.



Figur 5-5. Illustration av undersökningarnas produktion av primärdata och tolkning (modellering) av geometrier och egenskaper som resulterar i platsbeskrivande modeller. Uppdelningen av ämnesområden avser såväl undersökningar som modellering.

5.6 Arbetsmetodik för projektering

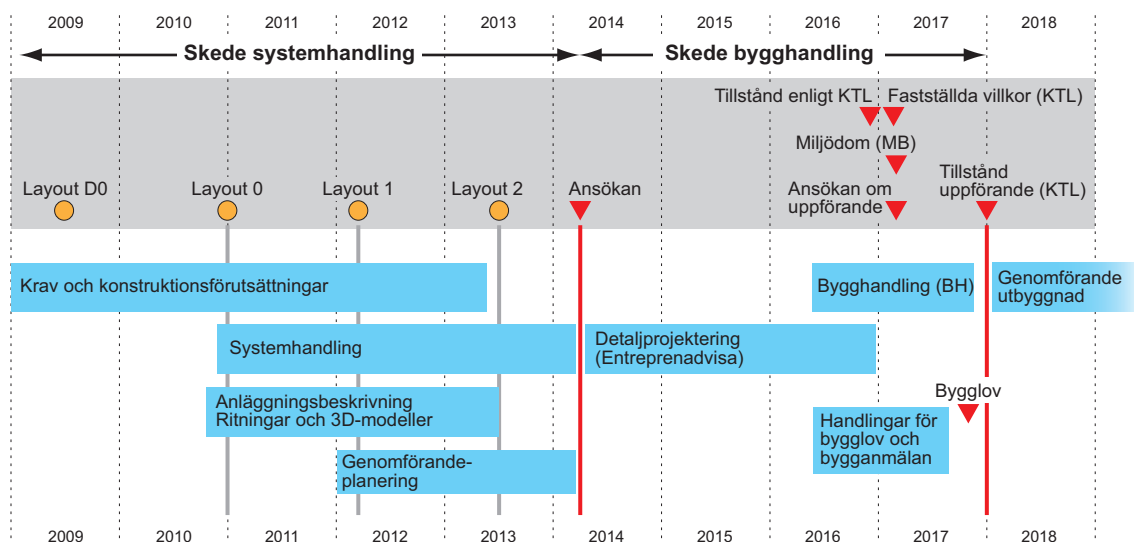
5.6.1 Anläggningsdelar

Anläggningsdelarna kan delas in i utrymmen under mark, byggnader ovan mark samt tekniska installationer. Placeringen av byggnader ovan mark är exempelvis beroende av placering av tunnelpåslag och eventuell utökning av ventilation. Information om vilka dimensioneringsförutsättningar som påverkar antalet bergutrymmen under mark finns i avsnitt 5.2.3.

5.6.2 Stegvis genomförande

Fram till byggstart sker projekteringen av SFR-utbyggnaden i två huvudskeden, systemhandling och bygghandling, se figur 5-6. Systemhandlingsskedet är i sin tur nedbrutet i ett antal layoutsteg, layout D0, 0, 1 och 2, med successivt framväxande mognadsgrad. Syftet med systemhandlingsskedet är att definiera anläggningen i tillräcklig grad så att drift- och långsiktig säkerhet kan analyseras samt att ta fram styrande underlag inför detaljprojekteringen. I bygghandlingsskedet genomförs detaljprojektering av anläggningen och förfrågningsunderlag och bygghandlingar tas fram.

Layout D0 av SFR färdigställdes under sommaren 2009. Referensutformningen baserades på bergutrymmenas tvärsnitt i befintligt SFR och dimensionerades utifrån de prognoser avseende volym avfall från drift samt nedmontering och rivning som gällde då. Målet med layout D0 var att ta fram underlag för att kunna påbörja den platsspecifika utformningen av förvaret, där även hänsyn tas till platsens geologiska och hydrogeologiska förutsättningar.



Figur 5-6. Översiktlig struktur för framtagande av projekteringsunderlag.

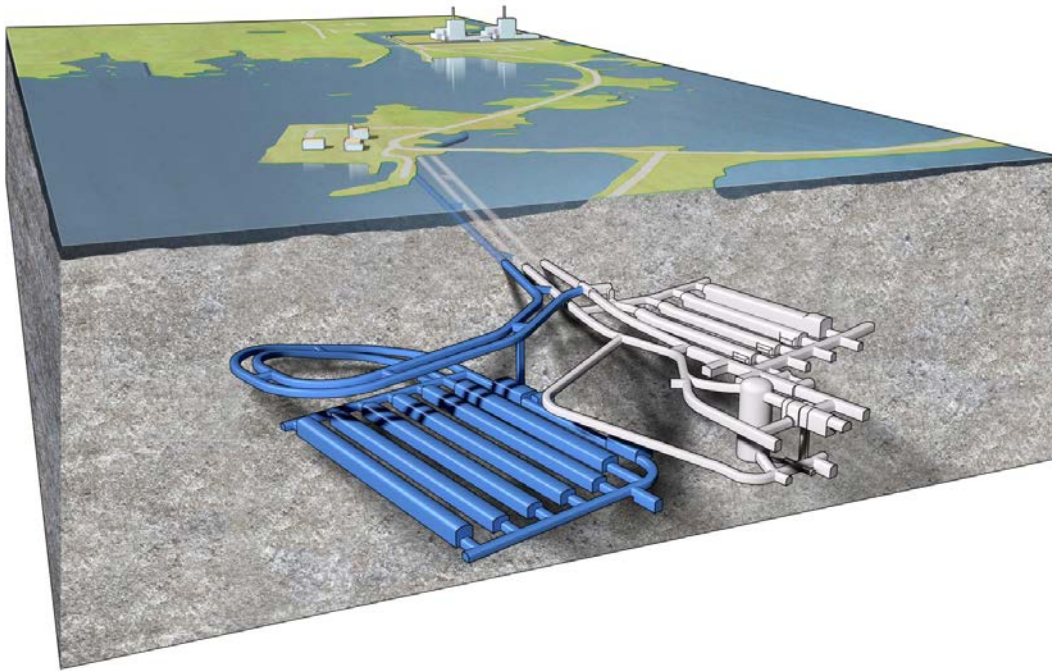
Layout 0 innebar en fördjupning av layout D0 och baserades bland annat på studier avseende preliminära krav och konstruktionsförutsättningar för installationer och utrustningar, till exempel ventilation, kraftmatning och brandsäkerhet, avfallsmängder och deras påverkan på bergssalarnas utformning.

Syftet med layout 1 var att, utifrån uppdaterade krav och konstruktionsförutsättningar samt resultat från platsmodellen, utgöra grunden för förberedande hydroanalyser för att placera anläggningen i berggrunden. I samband med layout 1 togs ett antal alternativa anläggningsutformningar fram för att kunna jämföra de hydrogeologiska egenskaperna, vilket är en viktig förutsättning för den långsiktiga säkerhetsanalysen. I samband med layout 1 fattades även beslutet att förlägga huvudnivån för den utbyggda delen till 120 meter under havsnivån. Utbyggnaden placeras således på ett större djup än i tidigare layouter. Huvudskälet till att lägga utbyggnaden på ett större djup är att anläggningen anpassats för att undvika vissa vattenförande strukturer inom det område intill befintligt SFR där utbyggnaden planerades från början (60 meter under havsnivån).

Baserat på resultaten av den hydrogeologiska modelleringen, och därmed den långsiktiga säkerheten, valdes en anläggningsutformning som huvudspår för det fortsatta arbetet och för de fortsatta analyserna. En 3D-bergmodell togs fram som ett mellansteg mellan layout 1 och 2 för att utgöra underlag för hydromodellering och analys av långsiktig säkerhet inför inlämnande av ansökningarna.

Layout 2 är den layout som har fastställts som referensutformning för den anläggning som beskrivs i säkerhetsredovisningen. Den ligger också till grund för ansökningarna enligt kärntekniklagen och miljöbalken, figur 5-7. Till layout 2 knyts även systemhandlingarna för de olika teknikområdena, till exempel VVS, byggnadsverk och el, som sedan utgör grunden för kommande detaljprojektering. Ett viktigt underlag som påverkar utformningen av anläggningen och anläggningens egenskaper avseende den långsiktiga säkerheten är utformningen av de tekniska barriärerna. Arbetet med dessa redovisas i avsnitt 8.1.

Under bygghandlingsskedet, som följer efter systemhandlingsskedet, genomförs detaljprojektering av anläggningen. Då tas förfrågningsunderlag, detaljerade tekniska beskrivningar för respektive entreprenad (berg, VVS, el, tele, etc), ritningar, bygghandling samt handlingar för ansökan om bygglov fram. Byggstart planeras till början av 2018.



Figur 5-7. Utbyggt SFR enligt layout 2 där den befintliga delen är ljusgrå och den planerade delen är blå.

5.7 Säkerhetsredovisning

Innan en kärnteknisk anläggning får uppföras och innan större ombyggnader eller större ändringar av en befintlig anläggning genomförs ska en preliminär säkerhetsredovisning sammanställas enligt SSM:s föreskrifter om säkerhet i kärntekniska anläggningar, SSMFS 2008:1. Den preliminära säkerhetsredovisningen för utbyggnaden av SFR kommer att bygga på anläggningens befintliga säkerhetsredovisning och förses med:

- Uppgifter om avfallet som planeras att förvaras i anläggningen.
- Uppgifter om anläggningens utformning efter utbyggnaden.
- Uppgifter om planerat driftsätt inklusive driftgränser.
- Beskrivningar av de säkerhetsanalyser och andra verifierande analyser som har gjorts av nya, planerade eller förändrade delar eller funktioner av anläggningen samt av sådana delar av anläggningen som inte har ändrats men som påverkas av förändringarna.
- Referenser till säkerhetsanalyser och andra verifierande analyser.

Till ansökan enligt kärntekniklagen om utbyggnad av SFR tas en förberedande preliminär säkerhetsredovisning för det utbyggda SFR fram. Den förberedande preliminära säkerhetsredovisningen kommer sedan att uppdateras och detaljeras för att därefter lämnas in för godkännande av SSM inför uppförandet av anläggningen. Inför provdrift tas en förnyad säkerhetsredovisning fram vilken ska avspegla anläggningen så som den är byggd. För SFR innebär det att säkerhetsredovisningen för befintligt SFR i detta skede kommer att ersättas av den förnyade säkerhetsredovisningen som beskriver provdrift av utbyggd anläggning. Innan den utbyggda anläggningen därefter får tas i rutinmässig drift ska säkerhetsredovisningen kompletteras med beaktande av erfarenheter från provdriften. Detta innebär att innehållet i säkerhetsredovisningen kommer att förändras över tiden. Den förberedande preliminära säkerhetsredovisningen innehåller översiktlig och konceptuell information vilken därefter preciseras för att innan provdrift detaljerat visa hur gällande krav på anläggningen och dess verksamheter har uppfyllts. I samtliga skeden ska säkerhetsredovisningen godkännas av SSM.

6 Slutförvaret för långlivat avfall

Slutförvaret för långlivat avfall (SFL) är det av SKB:s förvar som planeras att tas i drift sist. Innan SFL tas i drift är det flera viktiga milstolpar som måste passeras, såsom val av förvarskoncept och plats, utvärdering av den långsiktiga säkerheten, framtagning av ansökningar, bygge etc. SFL kommer att vara det minsta av de tre slutförvarerna med en beräknad deponeringsvolym på ungefär 16 000 kubikmeter.

I detta kapitel redovisar SKB sitt program för slutförvaring av det långlivade låg- och medelaktiva avfallet. Kapitlet presenterar handlingsalternativ för hantering av det avfall som planeras för deponering i SFL liksom för planering, utveckling och uppförande av slutförvaret. Vidare redovisas arbetet med uppdatering av referensinventariet och den pågående konceptstudien som värderar olika strategier för slutligt omhändertagande av SFL-avfall. Planeringen för utveckling av acceptanskriterier för avfall, värdering av den långsiktiga säkerheten och platsvalsprocessen presenteras också.

För att möta regeringens krav på fördjupad redovisning av olika handlingsalternativ för hantering och slutförvaring av avfallet och en konkretiserad redovisning av förvarsutformningar för SFL, redovisar SKB delar av det arbete som utförts inom ramen för konceptstudien. Konceptstudien presenteras i slutet av år 2013 och geologisk deponering bedöms utgöra en lämplig strategi för slutligt omhändertagande av SFL-avfall. De följande avsnitten redovisar SKB:s planering för SFL som ett geologiskt slutförvar.

Den övergripande planeringen för SFL redovisas som en del i företagets handlingsplan i kapitel 2. Avsnitt 4.2 behandlar uppkomst av det långlivade låg- och medelaktiva avfallet och nuläge för hanteringen av avfallet. Den teknikutveckling som sker för SFL redovisas i avsnitt 8.2, medan forskningsprogrammet för det långlivade låg- och medelaktiva avfallet redovisas i kapitel 21.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Planerna för det framtida arbetet med SFL beskrevs i Fud-program 2010. I granskningen av Fud-programmet framförde SSM önskemål om en fördjupad redovisning med hänsyn till olika handlingsalternativ för omhändertagande av långlivat låg- och medelaktivt avfall. Särskilt ansåg SSM att förutsättningar och val av handlingsalternativ med avseende på en möjlig tidigareläggning och ett etappvis uppförande av SFL ska framgå. En konkretiserad redovisning av de förvarsutformningar som SKB har börjat utveckla efterlystes. Vidare rekommenderade SSM regeringen att SKB:s framtagning av den fördjupade redovisningen ska ske i samråd med SSM.

Regeringens godkännande av Fud-program 2010 villkorades med krav på att reaktorinnehavarna inför redovisningen av kommande Fud-program fortlöpande ska samråda med SSM i frågor som rör långlivat låg- och medelaktivt avfall. SKB ska i Fud-program 2013 fördjupa redovisningen med hänsyn till olika handlingsalternativ för hantering och slutförvaring av avfallet och även ge en konkretiserad redovisning av de förvarsutformningar som SKB har börjat utveckla. Av redovisningen ska framgå förutsättningar och val av handlingsalternativ med avseende på en möjlig tidigareläggning och ett etappvis uppförande av SFL.

Nuläge

Arbetet med att identifiera möjliga slutförvarskoncept för SFL har inletts. Arbetet följer i huvudsak den metodik som SKB använt tidigare för systemanalys av olika lösningar för omhändertagande av använt kärnbränsle (SKB 1992, 2000a).

Arbetet omfattar:

- Identifiering av strategier för att omhänderta långlivat låg- och medelaktivt avfall.
- Identifiering av olika slutförvarssystem eller slutförvarskoncept för att genomföra en viss strategi.
- Identifiering och val av urvalsmetod och kriterier för urval.
- Utvärdering och val av förvarskoncept att arbeta vidare med.
- Utveckling och förbättring av valda förvarskoncept.
- Säkerhetsanalyser och slutligt val av ett förvarskoncept.

I det första steget identifieras förutsättningslöst olika strategier för slutligt omhändertagande av långlivat låg- och medelaktivt avfall, exempelvis deponering i djupa havssediment eller geologisk deponering. Baserat på de strategier som uppfyller lagar och internationella konventioner har olika slutförvarssystem eller slutförvarskoncept identifierats, där ett slutförvarskoncept utgörs av den uppsättning anläggningar och komponenter som krävs för att genomföra en viss strategi. Det kan finnas olika slutförvarskoncept som realiserar en viss given strategi. Exempelvis är SFR och KBS-3 två olika slutförvarskoncept för genomförande av geologisk deponering.

Parallellt med arbetet att identifiera strategier och förvarskoncept har studien utifrån lagar, föreskrifter och internationella konventioner identifierat krav på slutförvarssystemet och dess systemdelar. Dessa krav har sedan utgjort basen för att formulera utvärderingsfaktorer som används för att jämföra slutförvarskoncepten med varandra. Beskrivningar har utarbetats för de identifierade slutförvarskoncepten för att möjliggöra en jämförande värdering. Vidare har olika utredningar genomförts för att belysa skillnader mellan koncepten. Dessa utredningar fungerar som underlag till den avslutande utvärderingen. Utvärderingen tar hänsyn till hela hanteringskedjan från avfallets uppkomst till det förslutna förvaret och innefattar således inte enbart själva slutförvaret, utan även behovet av särskilda avfallskollin, konditioneringsmetoder etc. Även behov av teknikutveckling liksom bygg- och driftskeden beaktas.

Vid utvärderingen görs en samlad bedömning av slutförvarskoncepten med stöd av utvärderingsfaktorer kopplade till långsiktig säkerhet, miljö, teknik, kostnad och tid. Konceptstudien som presenteras i slutet av 2013 kommer att rekommendera högst två koncept för vidare värdering av den långsiktiga säkerheten.

Förutom den ovan beskrivna konceptstudien pågår även uppdatering av referensinventariet för SFL, vilket även det kommer att redovisas i slutet av 2013. Aktuell information rörande inventariet redovisas i avsnitt 6.4.

6.1 Samråd med SSM

Samråd mellan SSM och SKB rörande långlivat låg- och medelaktivt avfall har hållits två gånger under 2012. Vid samråden har SKB bland annat redovisat framdriften av konceptstudien, arbetet med uppdatering av referensinventariet för SFL samt aktuell forskning. SSM har även tidigt och på en övergripande nivå fått ta del av den redovisning som SKB planerat att ge i Fud-program 2013. Vid dessa tillfällen har SSM beretts möjlighet att framföra synpunkter på det arbete som bedrivs för att hantera det långlivade låg- och medelaktiva avfallet liksom planerna för redovisning av SFL i Fud-program 2013.

6.2 Handlingsalternativ för hantering av långlivat låg- och medelaktivt avfall

Hantering av avfallet som planeras för slutförvaring i SFL utgår från avfallet och dess egenskaper, samt de nu gällande planeringsförutsättningarna vad gäller drifttid för befintliga reaktorer.

De olika avfallstyperna som planeras att deponeras i SFL har olika egenskaper. Härdkomponenter och PWR-tankar från kärnkraftverken utgörs i huvudsak av stål och rostfritt stål. Styrstavarna

består av rostfritt stål och neutronabsorberande material som exempelvis borkarbid. Aktiviteten i bådadera härrör vid deponering huvudsakligen ifrån långlivade radionuklider som skapats genom neutronbestrålning. Det historiska avfallet är till stora delar redan konditionerat genom kringgjutning med cement och innehåller andra långlivade radionuklider, såsom uran och fissionsprodukter. Ur strålskyddssynpunkt utgör hårdkomponenter och styrvastav medelaktivt avfall där strålskydd krävs vid hantering, medan stora delar av det historiska avfallet kan hanteras utan strålskydd.

Då all hantering av avfallet innebär en risk för ökad dosbelastning bör hanteringskedjan planeras som en helhet. I bästa fall bör planeringen av hanteringskedjan ske redan innan verksamhet som genererar avfall påbörjas. I fallet med det avfall som ska till SFL är utgångspunkten en annan, då stora delar av avfallet redan existerar. Motivet för all hantering måste vara att säkerställa säkerheten efter förslutning av slutförvaret. Den långsiktiga säkerheten måste sedan vägas mot dosbelastningen på personal under hantering och drift.

Hantering och konditionering av hårdkomponenter

Konditionering av avfall syftar till att förändra avfallets egenskaper för att bättre möta uppställda krav, exempelvis på geometriska dimensioner, ytdosrat eller egenskaper som påverkar den långsiktiga säkerheten i ett slutförvar.

Hårdkomponenternas aktivitet när de tas ur reaktorn påverkar både hanteringsalternativ och val av slutförvarslösning. Den ur strålsäkerhetssynpunkt mest krävande radionukliden under de första 70 åren är kobolt-60. All hantering kräver strålskärning och eventuell sönderdelning av hårdkomponenter sker därför företrädesvis i bassängerna direkt på kärnkraftverken. Ur långsiktig säkerhetssynpunkt är aktiveringsprodukter som klor-36, nickel-59 och molybden-93 av stort intresse (SKB 1999). Frigörelsehastigheten för aktiveringsprodukter i hårdkomponenterna styrs av korrosionen av stål och rostfritt stål.

För hårdkomponenter kan tre huvudalternativ för hantering och konditionering formuleras:

1. Befintliga ståltankar (även kallade BFA-tankar) definieras som slutförvarskollin.
2. Avfallet packas i andra standardiserade skärmade behållare.
3. Avfallet genomgår avancerad konditionering, som smältning.

Ståltankarna ingår i ett system som har använts av OKG och senare av FKA för att lyfta ur sönderdelade hårdkomponenter för torr mellanlagring. Ståltankarna finns i olika modeller med olika godstjocklek som kan väljas utifrån avfallets aktivitet. Genom stålets goda strålskärmande egenskaper utgör ståltanken ett väl lämpat kולי för mellanlagring av hårdkomponenter. Ur långsiktig säkerhetssynpunkt tillför ståltanken ingenting, då en långsiktig inneslutande funktion inte kan påvisas. Ska ståltanken användas som slutförvarskולי bör tankarna öppnas och avfallet kringgjutats innan de placeras i slutförvaret för att undvika tomrum. Utredningar indikerar att det är tillrådligt att låta avfallet klinga av en viss tid före kringgjutning för att undvika radiolys. Ståltanksalternativet bedöms ur hanteringssynpunkt ge en begränsad dos till personal.

Det andra alternativet innebär att avfallet lastas i en skärmad behållare som utgör en del i ett enhetligt behållarsystem för SFL. En sådan skärmad behållare kan utformas antingen enbart utifrån ett strålskyddsperspektiv, eller utifrån ett perspektiv som kombinerar strålskydd och långsiktig säkerhet. En skärmad behållare som tillverkas med exempelvis genomgående svetsar skulle kunna tillskrivas en säkerhetsfunktion – inneslutning – i slutförvaret. Behållare i behållarsystemet kan transporteras i enhetliga transportbehållare, lyftas av samma lyftverktyg och staplas på varandra till önskad höjd. Detta kräver en omlastning av befintligt mellanlagrat avfall som i dag ligger i ståltankar hos FKA och OKG samt tillkommande avfall från Barsebäck. Denna hantering kräver förmodligen en central omlastningsanläggning där ståltankar öppnas och töms. Avfallet lastas i nya kollin, kringgjutts och transporteras till ett mellanlager eller direkt till slutförvaret. Dosbelastningen på personal beror framför allt på den avklingningstid som avfallet tillåts ha före hantering. Jämfört med alternativ 1 medför hanteringen risk för högre dosbelastning, men med fjärrmanövrerad hanteringsutrustning torde dosbelastningen kunna hållas nere. För att hålla dosbelastningen nere krävs att avfallet segmenteras till bitar som ryms både i en ståltank och i det enhetliga behållarsystemet. Ståltankar som töms kan efter enkel behandling, som exempelvis blästring, återanvändas eller friklassas i sin helhet.

Det metalliska avfallet kan smältas för att reducera avfallets volym och även för att reducera dess area- till volymförhållande. Denna metod bedöms i första hand vara lämpad för det rena metalliska avfallet och inte för styrstavar. Enligt den senaste säkerhetsanalysen för ett slutförvar för långlivat avfall (SKB 1999) påverkas utsläppen från förvarsdelen med hårdkomponenter främst av korrosionshastigheten hos stål. Genom att minska förhållandet mellan arean och volymen kan frigörelse-hastigheten för radionuklider uttryckt som vikt per tidsenhet minskas. Då avfallet till stor del består av tunna rör och plåtar kan smältning till cylindriska göt avsevärt minska frigörelse-hastigheten för aktiveringsprodukter såsom klor-36, nickel-59 och molybden-93.

Smältning av lågaktivt metalliskt avfall sker redan i dag i en smältanläggning inom Studsviks-området. SKB har låtit Studsvik Nuclear utreda förutsättningarna för att smälta medelaktivt metalliskt avfall, såsom hårdkomponenter. Slutsatsen är att uppemot 75 procent av hårdkomponenterna (och interndelar) kan smältas under förutsättning att de tillåts avklinga under åtminstone 50 år (Huutoniemi et al. 2012). Studsvik Nuclears bedömning är att det krävs teknikutveckling för att konstruera en anläggning som är helt fjärrkontrollerad och som under normal drift inte bedöms bidra med högre doser till personal jämfört med den befintliga smältanläggningen. Konsekvenserna i form av dos till personal vid oförutsedda händelser, såsom bortfall av elförsörjning eller en ångexplosion, är dock så stora att Studsvik Nuclear gör bedömningen att aktivitetsnivåerna i avfallet måste minskas innan det konditioneras med denna metod.

En avancerad konditionering såsom smältning kan endast motiveras om den krävs för att säkerställa den långsiktiga säkerheten. Metoden kräver att en ny anläggning byggs och den begränsade mängden avfall gör att kostnaden per viktighet konditionerat avfall blir hög. Dosbelastningen på personal blir med största sannolikhet den högsta av de tre redovisade alternativen. Det befintliga systemet där avfallet mellanlagras i ståltankar i väntan på konditionering kan användas på samma sätt som i dag.

Hantering och konditionering av PWR-tankar

Aktivitetssinnehållet hos PWR-tankarna är högre än hos BWR-tankarna. PWR-tankarnas mer kompakta dimensioner placerar tankens väggar närmare kärnen, vilket påverkar innehållet av aktiveringsprodukter. Aktiviteten är mycket ojämnt fördelad, med hög inducerad aktivitet närmast kärnen och avsevärt lägre aktivitet mot lock och botten. Den del som är närmast kärnen har sådana aktivitetsnivåer av långlivade radionuklider att den faller utanför vad som bedöms kunna deponeras i SFR.

De handlingsalternativ som har formulerats för hantering av PWR-tankar är:

1. Tankarna töms, segmenteras, sorteras och packas i ståltank.
2. Tankarna töms och direktdeponeras i ett slutförvar.
3. Tankarna direktdeponeras med hårdkomponenter och interndelar kvar i tanken.

Det första alternativet innebär att tanken töms på sitt innehåll medan den är kvar i reaktorinneslutningen. Hårdkomponenter och interndelar behandlas enligt hanteringsalternativen för hårdkomponenter ovan. Reaktortanken segmenteras sedan och delarna sorteras efter aktivitetsinnehåll. De delar som passar för slutförvaring i SFL placeras i ståltankar avsedda för detta, medan mindre aktiva delar hanteras i andra avfallsströmmar för deponering i exempelvis SFR.

I det andra alternativet hanteras den tömda PWR-tanken i ett stycke och transporteras till SFL för deponering av hela tanken utan segmentering.

I det tredje alternativet lämnas hårdkomponenter och interndelar kvar i PWR-tanken när den lyfts ur reaktorinneslutningen. Tanken hanteras i ett stycke och transporteras till SFL för deponering (av hela tanken) utan vidare tömning eller segmentering. Ringhals planering för nedmontering och rivning utgår i dag ifrån detta alternativ. Alternativet förutsätter att hårdkomponenter och interndelar säkras och att tanken avskärmas under transport.

Utformningen av SFL påverkas om Ringhals tre PWR-tankar ska deponeras hela. PWR-tankarna förutses kräva liknande tekniska barriärer som hårdkomponenterna, men behöver förmodligen en egen bergssal. Utformningen av ramp och förbindelsetunnlar på förvarsdjup behöver dimensioneras för att kunna ta emot hela tankar. De strålsäkerhetsmässiga och ekonomiska konsekvenserna av de olika alternativen behöver utredas.

Hantering och omkonditionering av det historiska avfallet

För det historiska avfallet, som redan är konditionerat, kan fyra huvudalternativ formuleras:

1. Avfallet hanteras utan vidare konditionering.
2. Avfallet packas i standardiserade behållare avsedda för SFL.
3. Avfallet återtas och sorteras.
4. Avancerad omkonditionering av avfallet, genom exempelvis krossning och förglasning.

Det första alternativet, att hantera individuella fat och avfallskollin med varierande dimensioner är tidsödande och olämpligt ur hanteringssynpunkt. Olika typer av kollin kräver olika hanteringsutrustning och transportbehållare. Att packa och stapla olika typer av kollin i ett förvarsutrymme kräver hänsyn till hållfastheten hos individuella kollin.

Det andra alternativet utgår från en rationell hantering med enhetliga och standardiserade hanterings-system. Detta alternativ innebär att det befintliga avfallet, som exempelvis redan är konditionerat i 200-litersfat eller 80-litersfat i femhålskokiller, lastas i behållare som utgör en del av ett enhetligt behållarsystem. Dessa behållare kan transporteras i enhetliga transportbehållare, lyftas av samma lyftverktyg och staplas på varandra till önskad höjd. Detta alternativ ger sannolikt lägre dosbelastning på personal jämfört med det första alternativet.

Det tredje alternativet innebär att det konditionerade avfallet återtas och sorteras. Det sker genom att kringgjutningen bryts upp eller krossas för att frigöra det ursprungliga avfallet. Avfallet karakteriseras, dokumenteras och sorteras i lämpliga avfallsfraktioner. Därefter kan avfallet konditioneras på nytt i lämpliga avfallskollin. Förfaringssättet liknar det som användes av SVAFO under perioden 1986–2002 för att tömma det aktiva tråget. Då konstruerades en ny anläggning med bland annat en hot-cell för att kunna hantera avfallet på ett strålsäkert sätt. De avsevärt mycket större volymerna som en hantering av allt historiskt avfall utgör, gör att en ny anläggning behöver byggas för att detta alternativ ska vara praktiskt genomförbart. En sådan anläggning kan konstrueras så att dosbelastningen på personalen blir liten. Till fördelarna med detta alternativ hör att osäkerheterna i inventariet förmodligen kan minskas avsevärt, liksom deponeringsvolymerna.

Det fjärde alternativet för hantering av det historiska avfallet innebär att en i Sverige ny typ av konditioneringsanläggning konstrueras och driftsätts. En tänkbar metod är att krossa det konditionerade avfallet i ett slutet utrymme varefter det upphettas till mycket hög temperatur för att skapa en glasartad slutprodukt som kan deponeras i slutförvaret. Med tanke på den heterogena sammansättningen hos det historiska avfallet kan flera olika konditioneringsprocesser krävas. Anläggningen kan förmodligen konstrueras så att dosbelastningen på personalen blir liten, men leder oundvikligen till radioaktivt sekundäravfall som filter från rökgasrening och avfall från nedmontering och rivning av anläggningen som också behöver slutförvaras. Detta måste vägas mot den förväntade nyttan i form av förbättrad långsiktig säkerhet som metoden medför. Anläggningar som i dag genomför konditionering av avfall på detta sätt finns i exempelvis Belgien (BelgoProcess) och Schweiz (Zwilag).

Flöden och transporter av långlivat låg- och medelaktivt avfall

SFL-avfallet finns i dag utspritt på i huvudsak fem olika geografiska platser – Barsebäck, Forsmark, Simpevarp, Ringhals och Studsvik. SFL-avfall från sjukvård, forskning och industri transporteras till Studsviksområdet, där det mellanlagras.

Samtliga platser med SFL-avfall har egna hamnar där SKB:s fartyg anlöper regelbundet. Vid utvärdering av den miljöpåverkan som transporter av SFL-avfall har, är lokaliseringen av slutförvaret den faktor som väger tyngst. Om SFL lokaliseras vid kusten eller nära kusten kan sjötransporter användas även för SFL-avfallet, vilket ger en mindre miljöpåverkan än motsvarande landtransporter. I lokaliseringsprocessen kommer miljöpåverkan av transporter att ingå som en del av analysen. Eftersom lokaliseringsprocessen för SFL ännu inte påbörjats är det inte möjligt att redovisa hur transporter kommer att se ut. I lokaliseringsprocessen för en konditioneringsanläggning behöver också miljöpåverkan av dessa transporter analyseras.

6.3 Handlingsalternativ för slutförvaring

SKB:s nuvarande planering för drifttagande av SFL redovisas i avsnitt 2.2, och figur 2-4 illustrerar utvecklingsstegen fram till ett driftsatt förvar för långlivat avfall. I följande avsnitt redogörs inledningsvis för utvecklingsstegen med syfte att redovisa möjligheter och begränsningar i utvecklingsarbetet samt uppskatta den tid som utvecklingsstegen förväntas ta. Utifrån dessa bedömningar diskuteras SKB:s tidsplan för drifttagande samt de två handlingsalternativen som innebär sent eller etappvis drifttagande av SFL.

Handlingsalternativen bygger på att ett geologiskt slutförvar utgör utgångspunkten för SKB:s fortsatta planering.

6.3.1 Utvecklingsstegen till ett driftsatt förvar

SKB:s plan för utvecklingen av SFL bygger på samma metodik som använts för Kärnbränsleförvaret: en stegvis och iterativ process där analyser av den långsiktiga säkerheten styr vägvalen och krav på teknikutvecklingen.

Driftsättningen av SFL kräver att en rad olika utvecklingssteg genomförs – teknikutveckling, platsval, analys av den långsiktiga säkerheten, framtagning av ansökningar, projektering samt uppförande och driftsättning.

Teknikutveckling

Utvecklingen av barriärer kräver återkoppling i form av regelbunden utvärdering av effekterna på den långsiktiga säkerheten. Teknikutvecklingen fram till ett driftsatt slutförvar bedöms behöva åtminstone ett par iterationer av utvecklingsprogram och efterföljande säkerhetsanalys. Erfarenhetsmässigt tar en sådan iteration cirka sex år. Teknikutvecklingen kräver även samspel med platsvalsprocessen för att nå en gynnsam kombination av tekniska barriärer och platsegenskaper.

De delar av teknikutvecklingen som kopplar till konstruktionen av anläggningen och utrustningen samt driften, kan förmodligen till stora delar hämtas från utvecklingen och driften av SFR. Hanteringen av avfall i SFL kommer sannolikt inte kräva specialutrustning, utan kommersiell standardutrustning eller modifierad standardutrustning kan användas.

Teknikutvecklingen kommer bedrivas parallellt i tiden med lokaliseringsprocessen. Utbyggnaden av SFR som nu förbereds utgör en viktig erfarenhet för teknikutvecklingen som är kopplad till SFL. Erfarenheterna av att planera och utveckla teknikutvecklingar för liknande anläggningar gör att SKB bedömer att osäkerheterna i tidsuppskattningen inom teknikutvecklingen är små relativt andra delar av programmet.

Sammantaget bedöms teknikutvecklingen inte som tidskritisk för etableringen av förvaret.

Platsval

De tidsmässiga aspekterna av platsvalsprocessen tillhör de svåraste att överblicka. Processen inrymmer lokalt förankringsarbete som är både nödvändigt och önskvärt. Erfarenheten från platsvalsprocessen för Kärnbränsleförvaret ger en indikation på i vilken takt den politiska processen utvecklas.

Den nuvarande planeringen bygger på antagandet att någon av de kommuner som redan tidigt deltar i en förstudie för SFL också har de säkerhetsmässiga faktorerna och den lokala acceptansen för en lokalisering. Skulle dessa förutsättningar saknas och kontakter med en utökad krets av kommuner i ett senare skede blir nödvändiga, fördröjs platsvalet förmodligen med i storleksordningen ett decennium.

Den rent tekniska delen av en platsundersökning på en till två platser med provborrning och monitorering tar enligt tidigare erfarenheter fem till sju år. Resultatet av undersökningarna behöver bearbetas och tolkas inför platsvalet.

Platsvalsprocessen utgör en tidskritisk del av programmet för att uppföra SFL och därför kommer en utredning om hur platsvalsprocessen ska bedrivas att starta under kommande Fud-period. Den process som SKB har för avsikt att genomföra för att slutligen välja plats presenteras i avsnitt 6.7.

Analys av den långsiktiga säkerheten

Säkerhetsanalyser utgör en viktig komponent i SKB:s teknikutveckling och platsvalsprocess. För att utvärdera konsekvenserna av tekniska lösningar och val av berggrund behöver mer eller mindre kompletta säkerhetsanalyser genomföras. En säkerhetsanalys tar cirka tre år att genomföra, under förutsättning att väsentliga delar av den grundläggande forskningen som behövs för analysen har genomförts i förväg. Inledningsvis följer analyserna direkt på teknikutvecklingsprogrammen i tiden och tidsåtgången bedöms inte kunna minskas nämnvärt. En platsspecifik säkerhetsanalys genomförs när platsen är vald och ligger till grund för ansökningarna om att få uppföra förvaret.

Säkerhetsanalyser och den forskning som är kopplad till säkerhetsanalyserna är högt specialiserade discipliner där kompetens tar lång tid att bygga upp. Den kompetens och metodik inom området som SKB byggt upp i arbetet med de två andra slutförvararna kommer även analysen för SFL till del.

Framtagning av ansökningar

Framtagning av ansökningar enligt kärntekniklagen och miljöbalken är sammanlänkat med analys av den långsiktiga säkerheten och platsvalsprocessen. Uppskattningsvis tar det två till tre år efter platsvalet för att genomföra miljökonsekvensbeskrivningar, sammanställa dokumentation etc. Delar av arbetet görs parallellt med den platsspecifika säkerhetsanalysen.

Projektering

SKB samlar genom arbetet med Kärnbränsleförvaret och utbyggnaden av SFR erfarenheter av projektering och byggplanering som även kan användas i arbetet med SFL. Visst projekteringsarbete kan genomföras parallellt med tillståndsprövningen, medan annat kan genomföras först efter att beslut om genomförande är fattat. Systemprojektering och detaljprojektering av de delar som ska byggas tidigt kan genomföras under tillståndsprövningen. Övrig detaljprojektering görs sedan i lämplig takt med hänsyn till övrig byggplanering. Projekteringen kan uppskattas ta ett par år från det att beslut om genomförande är fattat. Projekteringen kan ske parallellt med övrig planering för bygget. I ett större perspektiv är tidsåtgången för projekteringen således liten och ligger långt fram i tiden. Tiden förväntas inte kunna förkortas i nämnvärd omfattning.

Uppförande och driftsättning

Viss byggplanering kan ske under tillståndsprövningen. Efter att tillstånd erhållits och beslut har fattats om genomförande, kan själva bygget påbörjas inom ett par år och genomföras på sex till sju år. Bygget av tillfarter till förvarsnivån är tidskritisk och det finns små möjligheter att väsentligt öka takten på tunneldrivningen. Förvarsutrymmena är relativt små, så tidsvinster med parallella drivningsfronter är begränsade.

En möjlighet att avsevärt förkorta tiden för uppförande av SFL är att samlokalisera det med ett existerande förvar, exempelvis SFR. Den tidsödande tunneldrivningen till förvarsnivån kan då kortas.

6.3.2 Tidsplan för drifttagande av SFL

SKB:s tidsplan för drifttagande av SFL, som illustreras i figur 2-4, innebär att de olika delstegen som redovisats i avsnitt 6.3.1 genomförs i logisk sekvens och påbörjas direkt efter att konceptstudien avslutats. Om möjligt drivs aktiviteter parallellt för att minska den totala tidsåtgången. Den nuvarande planen leder fram till drift av SFL cirka 2045.

Som framgår av föregående avsnitt bedöms inte teknikutvecklingen vara tidskritisk för projektet. Den kedja av aktiviteter som bedöms som tidskritisk för utveckling och drifttagning är:

- Platsvalsprocessen.
- Platsspecifik säkerhetsanalys.
- Utarbetande av ansökningshandlingar.
- Tillståndsprovning.
- Projektering.
- Uppförande och driftsättning.

Platsvalsprocessens första del – den interna utredningen av hur platsvalsprocessen ska bedrivas – påbörjas under kommande Fud-period. Platsundersökningsskedet förväntas kunna inledas runt 2021 och pågå under fem till sju år. Platsvalet kan då ske cirka 2027 och därpå följer parallellt arbete med platsspecifik säkerhetsanalys och framtagande av ansökningshandlingar under tre år. Ansökningar om tillstånd att uppföra SFL lämnas in cirka 2030, varefter tillståndsprovningen tar vid. Om tillstånd att uppföra SFL fås 2036 eller senare startar detaljprojektering och byggplanering snarast därefter. Byggstart bedöms kunna ske ett par år efter ansökningarna godkänts och beslut om genomförande fattats. Bygget pågår sex till sju år varefter driftsättningen avslutas med ett års provdrift.

Sammantaget visar genomgången av de olika delstegen att driftsättning 2045 är ett ambitiöst, men inte orimligt mål att nå. Genomgången visar också att det finns begränsade möjligheter att driftsätta förvaret avsevärt tidigare. Osäkerheterna i tidsplaneringen hänförs främst till platsvalsprocessen, vilken även bedöms som tidskritisk.

Kan hårdkomponenterna deponeras direkt efter nedmontering och rivning av kraftverken, finns möjlighet att deponera de sista hårdkomponenterna runt 2055, om nedmontering och rivning av Forsmark 3 och Oskarshamn 3 påbörjas 2047 enligt nuvarande planering. Tidpunkten för förslutning av förvaret blir då avhängig det långlivade avfall som eventuellt uppstår vid nedmontering och rivning av Clink eller det långlivade avfallet som hanteras av Studsvik Nuclear.

Avvecklingen av Clink kan ske när allt använt kärnbränsle har kapslats in. Enligt planeringen inleds nedmontering och rivning omkring 2070 och avslutas efter fem till sju år. Avfallet från nedmontering och rivning av Clink ska enligt nuvarande planering slutförvaras i SFR. Skulle även långlivat avfall uppstå kommer det att behöva slutförvaras i SFL. Förslutning av SFL kan då inledas mellan 2075 och 2080.

Total drifttid givet att avfall från nedmontering och rivning av Clink behöver slutförvaras i SFL blir cirka 30 år. Deponering sker under det första decenniet efter driftsättning av både hårdkomponenter och befintligt avfall från SVAFO och Studsvik Nuclear. Under resten av förvarets drift deponeras fortlöpande de i sammanhanget små tillkommande avfallsvolymer från icke kärnteknisk verksamhet. Under de sista åren av förvarets drift deponeras det eventuellt långlivade avfall som uppstått vid nedmontering och rivning av Clink.

En fördel med en tidig utbyggnad av SFL är att mellanlagringen av det historiska avfallet kan avslutas och, i slutändan, SVAFO:s verksamhet avvecklas. Med ett slutförvar i drift kan acceptanskriterier för avfall formuleras, vilket gör det möjligt för kraftverken att slutligt konditionera sitt avfall i samband med nedmontering och rivning.

En längre drifttid ger större utmaningar vad gäller att säkerställa initialtillståndet för förvaret, då själva driftskedet tenderar att utöva påfrestningar på konstruktionerna under mark. De förvarsutrymmen som tidigt har färdigställts och fyllts med avfall behöver lämnas öppna under den resterande drifttiden och förslutas när deponeringen i samtliga förvarsdelar avslutats. Att försluta och vattenfylla enskilda förvarsutrymmen i ett i övrigt öppet förvar är olämpligt, eftersom vattenföringen genom den förslutna delen kan påverkas av att övriga delar alljämt läns pumpas.

6.3.3 Handlingsalternativet sent drifttagande

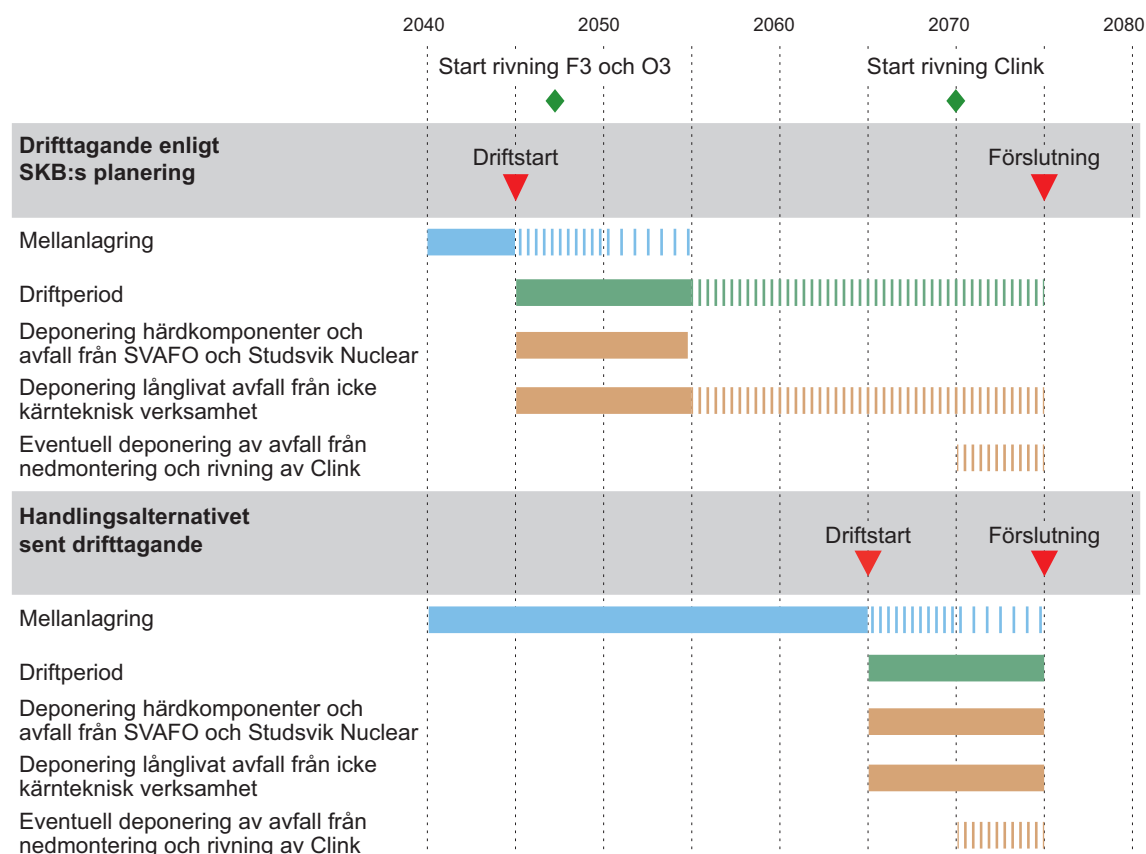
Handlingsalternativet sent drifttagande utgår från den planerade tidpunkten för förslutning och syftar till att ge en kortare drifttid för förvaret.

Om förslutningen planeras runt 2075, bör SFL tas i drift senast 2065, se figur 6-1. Då kan deponering av det historiska avfallet och hårdkomponenter ske först, vilket beräknas ta sju till åtta år. Därefter deponeras det eventuella avfallet från Clink och arbetet med förslutningen av förvaret kan sedan ta vid. De mellanlager som redan i dag är i drift för hårdkomponenter används för mellanlagring till dess att deponeringen kan ske. Det avfall som mellanlagras på Studsvik Nuclear och SVAFO:s områden mellanlagras även fortsättningsvis där.

Skulle konditionering genom smältning av det metalliska avfallet krävas för att säkerställa den långsiktiga säkerheten och det ur strålskyddssynpunkt bedöms tillrädligt att låta hårdkomponenterna avklinga innan konditioneringen sker, kommer hårdkomponenterna inte att vara tillgängliga för deponering förrän efter en avklingningsperiod på cirka 50 år. Barsebäck 1 stängdes 1999, varför konditionering av dess hårdkomponenter i så fall skulle kunna ske runt 2050. Konditioneringen utförs i kampanjer i den takt som reaktorerna stängts och därefter är avfallet klart för deponering. Konditioneringen och deponeringen av de sista hårdkomponenterna sker då runt 2100. Ett sent drifttagande innebär i så fall att SFL kan tas i drift cirka 2090, vilket ger en driftperiod på tio år under vilken allt avfall deponeras.

Fördelen med en kort driftperiod är att påfrestningarna på anläggningens konstruktioner blir mindre. Kostnaderna för mellanlagring under längre tid får vägas mot de minskade driftkostnaderna för förvaret.

En stor osäkerhet är hur SKB:s uppdrag förändras över tid, till exempel avseende hanteringen av radioaktivt avfall från icke kärnteknisk verksamhet, vilket kan påverka tidpunkten för förslutning. En nackdel med att koppla uppförandet av förvaret till ett avlägset planerat förslutningsdatum är risken för en glidning i tiden.



Figur 6-1. SKB:s tidsplan för drifttagande och förslutning av SFL och handlingsalternativet sent drifttagande. Drifttider och deponeringsperioder är markerade, liksom den planerade starten för nedmontering och rivning av Clink och de två reaktorer som tas ur drift sist.

6.3.4 Handlingsalternativet etappvis drifttagande

I handlingsalternativet etappvis drifttagande byggs förvarsutrymmen i den takt som behoven uppstår. Det historiska avfallet finns redan i dag och skulle enligt detta alternativ kunna deponeras först. Avfallet från nedmontering och rivning av reaktorerna uppstår först under 2020- till 2040-talen och skulle då deponeras i en andra etapp av SFL.

Den första driftsatta delen i ett etappvis byggt förvar bedöms inte kunna tas i drift tidigare än SKB:s nuvarande planering för drifttagning av SFL, det vill säga runt 2045. Den förkortade byggtiden för ett etappvis byggt förvar är försumbar i förhållande till de andra tidsrymderna, eftersom förvarsvolymererna är små. De utvecklingssteg som bedöms som gränssättande för tiden fram till byggstart är platsval, analys av den långsiktiga säkerheten och framtagning av ansökningar. Ingenta påverkas av det etappvisa förfarandet. De sista hårdkomponenterna tas ur Forsmark 3 och Oskarshamn 3 runt 2047 enligt nuvarande planering. Kan detta avfall deponeras utan omfattande konditionering, så är de sista hårdkomponenterna således tillgängliga relativt snart efter driftsättning enligt SKB:s nuvarande planering. Därmed faller själva idén med ett etappvis drifttagande. Skulle däremot omfattande konditionering av hårdkomponenterna behövas för att säkerställa den långsiktiga säkerheten, kan tidpunkten för deponering skjutas 50 år framåt i tiden. I så fall blir ett etappvis drifttagande ett reellt alternativ.

En fördel med ett etappvis drifttagande är att förvarsvolymer kan anpassas efter förändrade förutsättningar och nytt avfall, vilket inte kan uteslutas när tidsaxeln för förvarets drifttid är så pass utsträckt. En annan fördel är att de tekniska barriärerna i de senare uppförda förvarsutrymmena inte kommer att utsättas för de påkänningar som en utsträckt drifttid ger. Det som talar emot en etappvis utbyggnad är att de olika förvarsdelarna är relativt små, om man jämför med till exempel SFR. Den förvarsdel som i så fall skulle vara aktuell att uppföra sist är den för hårdkomponenter, som utgör en deponeringsvolym om ungefär 5 000 kubikmeter. Samtliga förvarsutrymmen behöver lämnas öppna tills förvarets driftperiod avslutats.

6.4 Uppdatering av referensinventariet

Enligt Fud-program 2010, avsåg SKB att ta fram ett uppdaterat referensinventarium för SFL. Syftet var att ta fram ett mer detaljerat inventarium där schablonmässiga antaganden i det tidigare inventariet från 1998 (Lindgren et al. 1998) ersatts med rapporterade avfallsmängder och uppdaterade bestämmingar av radionuklidinnehåll.

Nuläge

I figur 6-2 redovisas en översiktlig prognos för uppkomsten av långlivat låg- och medelaktivt avfall. Den totala volymen har beräknats till cirka 16 000 kubikmeter. Volymen har beräknats utifrån följande antaganden:

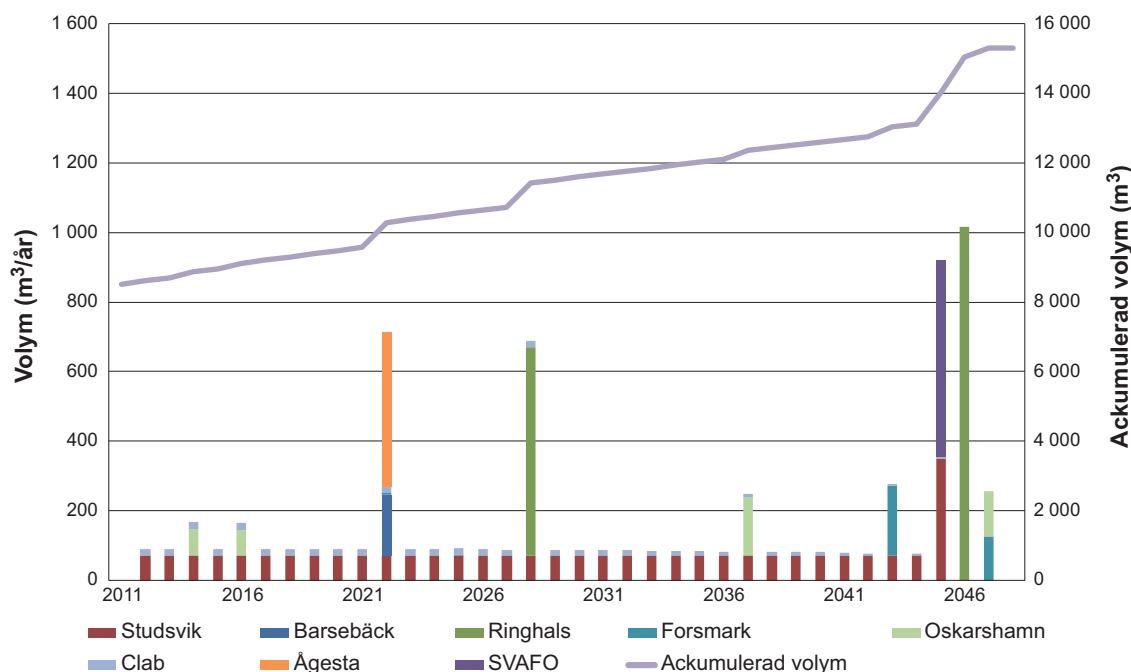
- Befintlig avfallsmängd är beräknad från inrapporterade data från avfallsproducenterna samt utdrag från databasen Draak för mellanlagrade hårdkomponenter och styrtavar i Clab (SKB 2002). I framtiden kommer denna databas att sammanfogas med databasen Gadd, för att omfatta såväl kortlivat som långlivat låg- och medelaktivt avfall, se avsnitt 4.3.3.
- Prognostiserade avfallsvolymer bygger på inrapporterad data från avfallsproducenterna samt antaganden om periodvisa byten av styrtavar (drifttid 15–20 år) och sonder (drifttid 10 år) för BWR.
- Avfallsmängder från nedmontering och rivning är hämtade från studierna för avveckling (Griffiths et al. 2008, SKB 2013c, d, e) samt inrapporterade volymer från Studsvik Nuclear och SVAFO.
- Studsvik Nuclears prognos för driftavfall sträcker sig till 2045, och därför har prognostiserat driftavfall fördelats jämt över åren fram till och med 2045 då även avfall från nedmontering och rivning av Studsvik Nuclear och SVAFO antas uppstå (även om datum för avveckling av Studsvik Nuclears anläggningar inte har fastställts).

- För hårdkomponenter och styrtstavar har deponeringsvolymen beräknats utifrån en packningsgrad på 1,1 ton per kubikmeter, en förväntad innervolym på sex kubikmeter samt en förväntad yttervolym på 9,9 kubikmeter, vilket motsvarar dimensionerna för en ståltank (inklusive innerkassett) med väggjockleken 150 millimeter.
- Styrtstavar från Ringhals PWR slutförvaras med det använda kärnbränslet.
- Hårdkomponenter och reaktortankar från PWR segmenteras och deponeras på samma sätt som hårdkomponenter från BWR. Alternativet att deponera PWR-tankarna hela (med eller utan hårdkomponenter), skulle reducera den totala deponeringsvolymen med 400–800 kubikmeter.

Historiskt avfall som hanteras av SVAFO

Det historiska avfallet som hanteras av SVAFO har inventerats under 2012. Den totala avfallsvolymen uppgår till cirka 6 500 kubikmeter och består till största delen av betongkringggjutet avfall i 200-litersfat, varav de flesta placerats i nya 280-litersfat. För majoriteten av dessa fat har röntgen- och gammaspektrometrisk mätning genomförts. Denna undersökning visar att flera fat innehåller fri vätska (som i vissa fall antas vara kvicksilver). Även efter denna analys är osäkerheten stor både vad gäller materialsammansättning och radionuklidinnehåll. Detsamma gäller även övrigt avfall innehållande sopor och skrot eftersom avfallet är heterogent, vilket försvårar en representativ provtagning samtidigt som avfallets ursprung inte är känt i detalj.

Relativt god information finns för de gammastrålande radionuklider som har kunnat mätas direkt samt aktinider vars totala mängd är känd (även om exakt fördelning på enskilda avfallskollin inte är möjlig med den information som finns tillgänglig i dagsläget). I inrapporterad redovisning har korrelationsfaktorer för Studsvik Nuclears avfall i databasen Triumf NG (SKB 2010b) ansatts, vilket ger en total aktivitet år 2075 på $1,3 \cdot 10^{15}$ becquerel (Bq). I nuläget saknas data för att motivera att dessa korrelationsfaktorer används generellt. Om användandet av korrelationsfaktorer begränsas till fat med aska eller slam och jonbytarmassa, blir den totala aktiviteten för avfallet $1,0 \cdot 10^{15}$ Bq år 2075.



Figur 6-2. Översiktlig tidsplan för uppkomsten av långlivat låg- och medelaktivt avfall. Staplarna visar det avfall som uppstår per producent och år (vänstra axeln). Kurvan visar den ackumulerade volymen (högra axeln). Data för Clab innefattar endast mellanlagrade styrtstavar och hårdkomponenter.

Avfall från Studsvik Nuclearns verksamhet samt övrig svensk forskningsverksamhet

Redovisat befintligt långlivat låg- och medelaktivt avfall från Studsvik Nuclear, utgörs av fat med aska, slam och jonbytmassor samt sopor och skrot. Den totala volymen för det befintliga avfallet är cirka 1 200 kubikmeter och aktiviteten för det totala radionuklidinventariet är $1,3 \cdot 10^{12}$ Bq år 2075. Prognostiserade avfallsvolymer fram till och med 2045 samt avfall från nedmontering och rivning av Studsvik Nuclearns anläggningar uppgår till cirka 2 700 kubikmeter, men för detta avfall saknas aktivitetsinformation. Eftersom Studsvik Nuclearns verksamhet, i jämförelse med kärnkraftverken, genererar avfall av mycket skiftande karaktär måste en långtidsprognos för driftavfall betraktas som mycket osäker.

Avfall från kärnkraftverk

Långlivat låg- och medelaktivt avfall från kärnkraftverken utgörs främst av neutronbestrålade intern- delar från reaktorerna. Radionuklidinventariet har bestämts från aktivitetsberäkningar gjorda för studierna för avveckling samt inrapporterade data från kärnkraftverken. Befintligt avfall utgörs av mellanlagrade hårdkomponenter på kärnkraftverken och i Clab samt mellanlagrade styrestavar i Clab. Prognosen har beräknats utifrån kvarvarande drifttid och förväntad drifttid för sonder och styrestavar samt inrapporterade prognoser för byte av större hårdkomponenter.

Den sammanlagda aktiviteten för hårdkomponenterna är $1,9 \cdot 10^{17}$ Bq år 2075 och deponerings- volymen uppskattas till cirka 4 600 kubikmeter. För prognostiserade styrestavar och sonder har radionuklidinnehåll från studierna för avveckling använts (dessa har inkluderats i aktivitetsberäkningarna även om de inte utgör en del av själva avfallet från nedmontering och rivning). Beräknad aktivitet från studierna för avveckling har även använts för att komplettera inventariet för komponenter där aktivitetsdata saknas (främst äldre styrestavar).

Program

Ett uppdaterat inventarium planeras vara färdigställt till slutet av 2013. Inventariet kommer att representera aktuell kunskap om långlivat låg- och medelaktivt avfall baserat på inrapporterade data från samtliga avfallsproducenter. Detta inventarium kommer att uppdateras löpande. Från arbetet med referensinventariet kommer även ett uppdaterat kemotoxiskt inventarium att tas fram.

Historiskt avfall som hanteras av SVAFO

Utvecklingen av förvarskoncept för SFL och acceptanskriterier för långlivat låg- och medelaktivt avfall pågår. Parallellt med detta kommer SKB att klargöra behovet av kompletterande studier för att minska osäkerheten i material- och radionuklidinnehåll. SKB kommer också att begära in kompletterande information om avfall som ännu inte är inventerat samt en mer detaljerad redovisning av materialmängder särskilt med avseende på kemotoxiska ämnen.

Avfall från Studsvik Nuclearns verksamhet samt övrig svensk forskningsverksamhet

Prognoserna för driftavfallet från Studsvik Nuclearns verksamhet kommer att uppdateras kontinuerligt och radionuklidinventariet kommer att kunna beräknas när nya nuklidvektorer tas fram för de olika anläggningarna. Utöver detta kommer det att produceras radioaktivt avfall vid ESS (European Spallation Source) i Lund.

Avfall från kärnkraftverk

SKB avser att löpande uppdatera inventariet för hårdnära komponenter från kärnkraftverken, med syfte att successivt minska osäkerheten i beräknat radionuklidinnehåll. Mer detaljerade beräkningsmetoder och noggrannare data på materialsammansättning och avfallsmängder kommer att användas i takt med att de görs tillgängliga. Nya beräkningar kommer även att genomföras för att komplettera data avseende radionuklidinventariet för äldre styrestavar där detta i dag saknas.

6.5 Acceptanskriterier för avfall

Acceptanskriterier för konditionerat avfall som ska slutförvaras i SFL kommer att kunna fastställas först när beslut har fattats om förvarskoncept.

Program

Parallellt med utvecklingen av förvarskoncept kommer SKB att utarbeta acceptanskriterier för avfall som avses att deponeras i ett framtida SFL. De egenskaper som kommer att ligga till grund för acceptanskriterierna kommer att identifieras med utgångspunkt från acceptanskriterier för SFR, se avsnitt 4.3.1, egenskaper hos det befintliga avfallet samt förvarskonceptens egenskaper. I takt med att detaljer kring förvarets utformning konkretiseras kommer acceptanskriterierna att kunna preciseras. Slutgiltiga acceptanskriterier kommer definieras när förvarsutformningen bestämts. Acceptanskriterierna kommer även att tydliggöra vilket avfall som, ur ett ALARA- och BAT-perspektiv, bör deponeras i SFL.

6.6 Säkerhetsvärdering

SKB:s metod för utveckling av SFL är en iterativ process där teknikutveckling och forskning följs av utvärdering av den långsiktiga säkerheten hos förvaret. Den värdering av den långsiktiga säkerheten som planeras till 2016 är inte en fullständig säkerhetsanalys, då viktiga komponenter för att göra en sådan analys saknas, exempelvis platsspecifika data. Syftet med säkerhetsvärderingen är att välja SKB:s huvudinriktning bland olika förvarskoncept. Dessutom ska säkerhetsvärderingen utveckla kravbilderna för avfallet, de tekniska barriärerna och berget. Detta för att stödja arbetet med acceptanskriterier för avfallet, den fortsatta teknikutvecklingen och platsvalsprocessen. Säkerhetsvärderingen utgör även en bas för att identifiera områden för fortsatt forskning och fungerar som stöd för att välja och prioritera de områden där de största utvecklingsbehoven föreligger.

Utöver den preliminära säkerhetsanalysen från 1999 (SKB 1999) utgör konceptstudien och det uppdaterade referensinventariet som båda redovisas i slutet av 2013 viktiga underlag till säkerhetsvärderingen, liksom resultat från genomförda forskningsprojekt för SFL och andra slutförvar. Platsdata kommer att hämtas från platsundersökningarna för Kärnbränsleförvaret. Ytterligare underlag utgörs både av internationella databaser för egenskaper, händelser och processer i slutförvar och SKB:s egna databaser för egenskaper, händelser och processer från exempelvis säkerhetsanalyserna för Kärnbränsleförvaret och det utbyggda SFR.

6.7 Platsvalsprocessen

SKB har sedan tidigare lagt fast grundkraven för lokaliseringen av SFR:

- En berggrund som medger att säkerhetskraven uppfylls.
- En politisk och allmän acceptans i den berörda kommunen och bland närboende.

Utgångspunkten för platsvalet för SFL är att genomföra en stegvis platsvalsprocess enligt samma metodik som använts för Kärnbränsleförvaret. I en sådan process är de säkerhetsrelaterade egenskaperna och den lokala acceptansen styrande för lokaliseringen men även andra faktorer såsom hälsa, miljö och samhällsresurser vägs in. Målsättningen är att driva en öppen och transparent process i samverkan med SSM och kommuner, där förutsättningarna för olika aktörer tidigt är klarlagda och där processens olika steg är förankrade och kommunicerade.

Utredning av platsvalsprocessen

Under kommande Fud-period startar en intern utredning av den process som leder fram till valet av plats för SFL. Utredningen kommer att identifiera kompetensbehov och lämplig organisation för lokaliseringsarbetet och presentera en plan för hur arbetet med platsvalet kommer att bedrivas.

Vidare kommer utredningen, efter att säkerhetsvärderingen genomförts, att föreslå utvärderingsfaktorer för platsvalet (lokaliseringsfaktorer), kategoriserade utifrån säkerhetsrelaterade platsegenskaper, samhällsresurser, teknik för genomförandet samt miljö och hälsa.

Förstudieskedet

Baserat på resultaten från den värdering av den långsiktiga säkerheten av förvarskoncept för SFL som planeras till 2016 kan preliminära krav på platsen för slutförvaret ställas. Dessa preliminära krav i kombination med de identifierade lokaliseringsfaktorerna ger förutsättningar för att sondera möjligheterna till lokalisering utifrån både platsegenskaper och lokal acceptans. SKB:s intention är att påbörja den lokala förankringsprocessen för SFL genom dialog med kommuner och allmänhet efter att säkerhetsvärderingen genomförts.

SKB:s inriktning är att i första hand vända sig till kommuner där goda förutsättningar för att kunna uppfylla den långsiktiga säkerheten bedöms finnas och som sedan tidigare visat intresse för lokalisering av kärntekniska anläggningar. Samtidigt ställer sig SKB positivt till initiativ från enskilda kommuner att delta i förstudier och sådana initiativ kommer att behandlas utifrån samma förutsättningar som de kommuner som är föremål för mer riktade kontakter. SKB utesluter inte möjligheten att ytterligare andra kommuner kommer att kontaktas i den här fasen av processen. De kommuner som väljer att delta i en förstudie kommer att utredas utifrån de lokaliseringsfaktorer som ställts upp. Arbetet kommer att bedrivas i dialog och samverkan mellan SKB och berörd kommun.

Platsundersökningsskedet

I den eller de kommuner som visar intresse att stå som värd för SFL och där SKB utifrån förstudierna bedömer att förutsättningarna är goda, kommer platsundersökningar att genomföras. Platsundersökningarna innebär en etappvis karakterisering av föreslagna platser, där platsens säkerhetsrelaterade egenskaper liksom miljömässiga och samhällsliga faktorer kartläggs mer i detalj. Efter genomförda platsundersökningar utvärderas den eller de platser som undersökts och först därefter tas beslut om lokaliseringen av SFL.

Program

Lokaliseringsarbetet påbörjas under kommande Fud-period. En intern utredning kommer att identifiera kompetensbehov och lämplig organisation för lokaliseringsarbetet och efter att säkerhetsvärderingen genomförts presentera en plan för hur arbetet med platsvalet kommer att bedrivas. Vidare ska utredningen föreslå utvärderingsfaktorer för platsvalet (lokaliseringsfaktorer), kategoriserade utifrån säkerhetsrelaterade platsegenskaper, samhällsresurser, teknik för genomförandet samt miljö och hälsa.

7 Markförvar

I detta kapitel redovisas hur frågan om slutförvaring av mycket lågaktivt, kortlivat avfall som uppstår vid nedmontering och rivning av kärnkraftverken är tänkt att tas om hand. Detta avfall utgör en relativt stor andel av avfallet från nedmontering och rivning, men innehåller endast en bråkdel av radioaktiviteten. Jämförelser visar att det kan vara fördelaktigt att lägga det i markförvar i stället för att deponera det i SFR. En konventionell avfallsanläggning i kombination med ett avklingningslager kan även utgöra ett komplement till markförvar. Detta ger större möjlighet till källsortering av mycket lågaktivt, kortlivat avfall från nedmontering och rivning.

Kärnkraftverken i Forsmark, Oskarshamn och Ringhals redovisar i sina avvecklingsplaner att markförvar för det mycket lågaktiva avfallet från nedmontering och rivning ska finnas tillgängligt, se avsnitt 9.3. BKAB ställer sig positiva till möjligheten att deponera mycket lågaktivt avfall från nedmontering och rivning i ett centralt markförvar. Därmed ser tillståndshavarna för kärnkraftverken att det framtida huvudalternativet för slutförvaring av det mycket lågaktiva och kortlivade avfallet från nedmontering och rivning är markförvar. I nuläget ingår detta avfall i ansökningarna om att bygga ut SFR för att erhålla viss flexibilitet och handlingsfrihet.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I sin granskning av Fud-program 2010 såg SSM positivt på de initiativ som har tagits för att erhålla en bättre uppskattning av vilka mängder avfall från nedmontering och rivning som avses att placeras i markförvar. SSM ansåg dock att informationen i Fud-programmet angående det arbete och de förstudier som har genomförts var alltför knapphändig för att kunna bedömas. Exempelvis återfanns ingen referens till någon rapport om förstudien kring markförvaring. Det framgick inte heller när det strategiska beslutet om deponering i markförvar skulle tas.

SSM ansåg det vara angeläget att industrins avsikter att eventuellt markförvara mycket lågaktivt avfall vidareutvecklas och konkretiseras, i synnerhet med tanke på den starka kopplingen till dimensioneringsbehovet av ett utbyggt SFR för avfall från nedmontering och rivning.

SSM ansåg att markförvarsanläggningar behöver ses som en del i ett större system av olika möjligheter att omhänderta avfall. Riktlinjer behöver utvecklas av industrin för vilket avfall som kan och bör slutförvaras genom markförvaring. Avfall som kan återvinnas eller återanvändas på ett miljö- och strålskyddsmässigt samt kostnadseffektivt sätt bör enligt SSM:s syn inte deponeras i slutförvar. Flera remissinstanser delade denna bedömning. Som SSM framförde i granskningen av Fud-program 2010 behöver de riktlinjer för styrning av avfall mellan de olika förvarsdelarna i SFR även inkludera markförvar och SFL.

Enligt yttrandet över Fud-program 2010 kunde Kärnavfallsrådet inte se några reella skäl för att inte låta hushållnings- och kretsloppsprinciperna få fullt genomslag i samband med behandlingen av radioaktivt avfall. Detta gällde särskilt för mycket lågaktivt avfall som deponeras i markförvaren vid kärnkraftverken och på Studsviksområdet.

Nuläge

Sedan Fud-program 2010 har det lågaktiva avfallet från nedmontering och rivning som avses att deponeras i det utbyggda SFR undersökts för att kunna bedöma hur stor andel som kan vara aktuellt att förvara i ett markförvar. Avfallsinventariet från studierna för avveckling för kärnkraftverken i Forsmark, Oskarshamn och Ringhals, där markförvar finns i drift, har analyserats. Resultaten tyder på att cirka hälften av det lågaktiva avfallet från nedmontering och rivning kan vara aktuellt för slutförvaring i markförvar liknande dem som i dag finns för driftavfall i stället för att deponeras i SFR.

Det finns i dag inget tillstånd att förvara lågaktivt avfall från nedmontering och rivning i markförvar så dimensioneringen för utbyggnaden av SFR innefattar allt detta avfall.

Program

SKB har under 2013 startat ett projekt som syftar till att ta fram underlag för att fatta beslut om huruvida ett markförvar på ett miljö- och strålskyddsmässigt samt kostnadseffektivt sätt, kan fungera som ett alternativt slutförvar för delar av avfallet från nedmontering och rivning samt om konventionella avfallsanläggningar på något sätt kan utnyttjas.

Om markförvar visar sig vara ett fördelaktigt förvaringsalternativ ska beslut fattas om huruvida SKB bör driva ett centralt markförvar eller om markförvaren som i dag finns lokalt i anslutning till kärnkraftverken bör byggas ut och användas.

Målet är att de principiella frågorna ska vara besvarade i början av 2014 och att projektavslut med efterföljande beslutade inriktningar kan göras under innevarande treårsperiod.

8 Teknikutveckling för slutförvaring av låg- och medelaktivt avfall

8.1 Slutförvar för kortlivat avfall

I SFR deponeras avfall som uppkommer under drift, underhåll samt vid avveckling av de svenska kärnkraftverken. Förvaret består i dag av fyra bergssalar för olika typer av avfall, en bergssal för lågaktivt avfall, 1BLA, en bergssal för medelaktivt avfall, 1BMA, två betongtankförvar, 1BTF och 2BTF, samt en silo. Den totala befintliga deponeringsvolymen är cirka 63 000 kubikmeter. I dagsläget planeras och projekteras för en utbyggnad av SFR på motsvarande 110 000 kubikmeter för att bereda plats för det avfall som uppkommer i samband med avveckling av de svenska kärnkraftverken samt med utrymme för nio BWR-reaktortankar. Totalt planeras för sex bergssalar varav fyra för lågaktivt avfall, 2–5 BLA, en bergssal för hela reaktortankar, BRT, samt en bergssal för medelaktivt avfall, 2BMA. I huvudsak kommer allt avfall att anlända till SFR emballerat. Undantaget kommer att vara stora komponenter, såsom hela reaktortankar. Avfallet är behandlat och anpassat efter de behållare som kan hanteras inom SFR. De olika typerna av avfallskollin som kan och planeras att hanteras inom SFR är ISO-containerar helhöjd respektive halvhöjd, betongtankar, plåtfat, betongkokiller, plåtkokiller samt fyrkokiller. Fyrkokillen är ett emballage som avses användas för avfall från nedmontering och rivning och har ett yttermått av 2,4×2,4×1,2 meter (bredd×längd×höjd).

I följande avsnitt beskrivs de tekniska barriärerna samt den teknikutveckling som ligger till grund för barriärernas detaljerade utformning.

8.1.1 Översikt av tekniska barriärer

De tekniska barriärerna i SFR har till syfte att förhindra eller fördröja utsläpp av radionuklider till omgivningen. Beroende på avfallets egenskaper ställs olika krav på val av barriärer. I BLA baseras säkerheten på det begränsade nuklidinventariet och därför finns inga tekniska barriärer där. I BMA utgörs den huvudsakliga tekniska barriären av en betongkonstruktion som avfallskollin placeras i. Utrymmet mellan betongkonstruktion och berget återfylls med bergkross vid förslutning. I silon utgörs de tekniska barriärerna av både en betongkonstruktion i vilken avfallet kringgjutits samt en bentonitfyllnad mellan betongkonstruktionen och bergväggen för att ytterligare minska vattenflödet genom förvaret. I betongtankförvaren (1BTF och 2BTF) utgörs de tekniska barriärerna av betongtankarna och kringgjutningen av dessa. I 1BTF finns även askfat som successivt kringgjuts med betong. Utrymmet mellan kringgjutningen och berget återfylls med bergkross vid förslutning.

För att de tekniska barriärerna ska uppfylla förväntad långsiktig funktion krävs noggrannhet i val av material och metoder för konstruktionernas uppförande. I detta avsnitt beskrivs den verksamhet som syftar till att utveckla design och konstruktionsmetoder för uppfyllande av krav på långsiktiga egenskaper hos de tekniska barriärerna. Den forskning som görs kring materialens utveckling beskrivs i kapitel 22 (Betongbarriärer) och 25 (Buffert och återfyllning).

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 beskrevs planerna för teknikutvecklingsarbetet för SFR-utbyggnad kortfattat.

I sin granskning framförde SSM att redovisningen av programmet var alltför kortfattad för att man skulle kunna ta ställning till detta. Om kommande utbyggnad av SFR ska uppfylla kravet på bästa möjliga teknik kan, enligt SSM, förstärkningar av barriärfunktionen för BLA-liknande förvar vara nödvändiga.

Program

Utformningen av de tekniska barriärerna i den utbyggda delen av SFR kommer att skilja sig från utformningen av den befintliga anläggningen. För att säkerställa att tänkta lösningar kommer att kunna genomföras har bland annat följande utvecklingsbehov identifierats:

- 2BMA, gjutning av barriär utan armering.
- 2BMA, utveckling av betongrecept för gjutning av barriärer utan armering.
- Utveckling av kringgjutningsbruk och metod för kringgjutning i 2BMA.

Utöver nyutveckling av material och metoder för uppförande av utbyggnaden av SFR har även erfarenheter från den befintliga anläggningen pekat på förbättringsbehov, såsom efterkontroller vid uppförandet samt styrning av miljön i förvaret. Det senare omfattar bland annat styrning av luftfuktigheten samt att dropp från inläckande grundvatten på teknikinstallationer och barriärer förhindras genom installation av exempelvis en tunnelduk.

8.1.2 Tekniska barriärer för silon

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Teknikutvecklingen kopplad till silon beskrevs inte i Fud-program 2010. I sin granskning av teknikutvecklingen hade SSM inget att framföra. Dock noteras på annan plats i granskningen att SSM såg positivt på den översyn och de åtgärder som SKB planerade mot bakgrunden av att kontaminerat grundvatten påträffats i ett antal fack i betongsilon.

Nuläge

Under 2011–2013 har SKB låtit genomföra ett antal utredningar kopplade till förekomsten av grundvatten i silon. I detta arbete har effekterna av förekomst av vatten i silon liksom sannolikheten att vatten förekommit i silon vid kringgjutning utretts.

De experimentella undersökningarna som genomförts har visat att bruket separerar om vatten finns i facket vid kringgjutning. Denna separation leder till att det bildas ett cementrikt skikt överst och ett skikt rikt på ballast i botten av brukspelaren. De hydrauliska och mekaniska egenskaperna hos dessa två skikt har undersökts vidare i ett antal utredningar, främst med fokus på studier av de hydrauliska egenskaperna hos det cementrika skiktet. Dessa avgör nämligen huruvida det aktuella kringgjutningsbruket uppfyller kraven på gasgenomsläpplighet.

Studierna har visat att den hydrauliska konduktiviteten för det cementrika skiktet varierar något från prov till prov, men att den i genomsnitt ligger över kravnivån för de prov som anses bäst representera det cementrika skiktet som bildats vid gjutning i vattenfylld spalt.

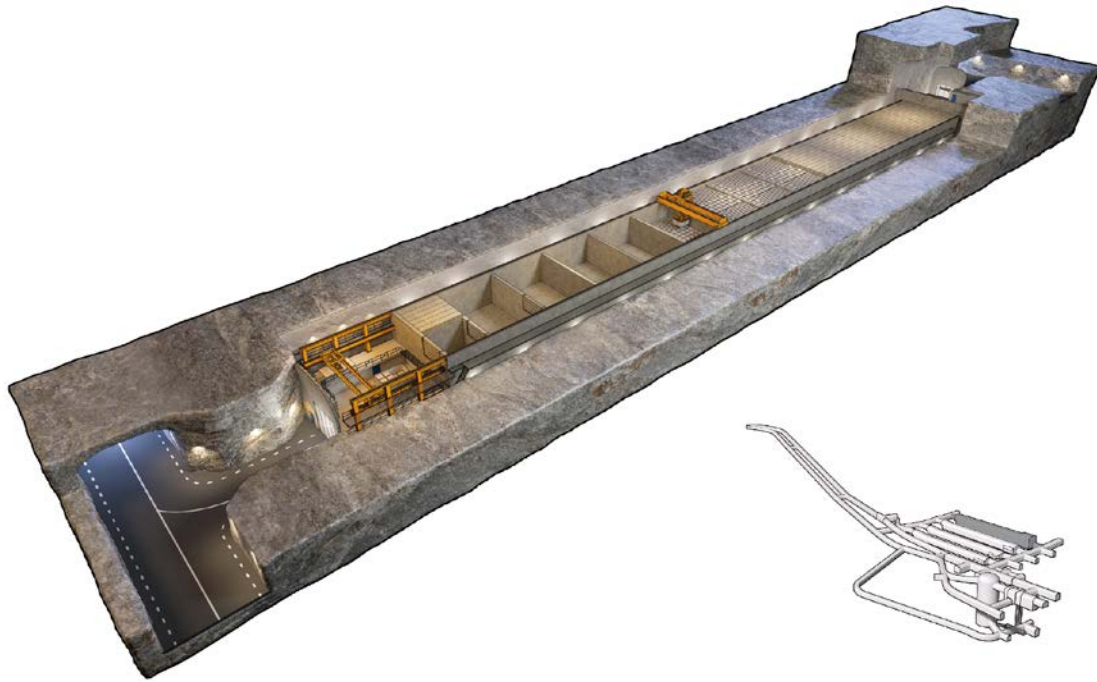
Program

SKB har i dagsläget inga planer på att genomföra ytterligare experimentella undersökningar inom detta område utan kommer att sammanställa och utvärdera resultaten från de genomförda undersökningarna.

8.1.3 Tekniska barriärer för medelaktivt avfall i befintligt SFR

BMA utgörs av en 140 meter lång betongkonstruktion vilken är indelad i 15 fack. I dessa deponeras konditionerat avfall i betong- eller stålkokiller samt plåtfat, se figur 8-1.

Vid byggandet utformades anläggningen för en planerad drifttid på cirka 30 år. Motivet till detta var det beslut som fattats, att SFR skulle förslutas cirka år 2010 då den svenska kärnkraften skulle fasa ut. I och med att nya beslut har fattats om förlängda drifttider för kärnkraftverken behöver SFR hållas öppet längre.



Figur 8-1. BMA – Bergssal för medelaktivt avfall i befintligt SFR.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 redovisade SKB sina planer för ett undersökningsprogram vars syfte var att kartlägga anläggningens status både avseende system och byggnader. Utredningen skulle även peka på behov av reparationsåtgärder och föreslå tidpunkter för dessa. SSM framförde i sin granskning inga synpunkter kring detta.

Nuläge

Under 2010 och 2011 genomfördes ett omfattande undersökningsprogram av statusen hos betongkonstruktionerna i BMA. Lärdomarna från detta undersökningsprogram kommer även att tjäna som underlag vid utformningen av utbyggnaden av SFR.

Utredningen visade att det förekom skador orsakade av armeringskorrosion, som i sin tur orsakats av att klorider anrikats i ytskikten till följd av dropp av kloridhaltigt grundvatten på betongkonstruktionen. Skadorna uppträdde såväl på de tekniska barriärerna som på andra konstruktionsdelar där ståldetaljer gjutits in i betong, exempelvis fundament.

Utöver skador orsakade av korrosion av ingjutet stål noterades även genomgående sprickor i konstruktionerna. Sprickorna har uppkommit redan vid konstruktionernas uppförande och härstammar från avsvalningsrörelser vid gjutning i kombination med krympning av betongen.

Under 2012 genomfördes en undersökning av kringgjutning av avfallet i BMA. Syftet var att undersöka möjligheterna att utnyttja det kringgjutningsbruk som i dag används i silon även för kringgjutning av avfallet i BMA samt om metoden var lämplig för detta. Studien visade att varken bruket eller metoden var lämplig för kringgjutning av BMA (Pettersson och Thunberg 2012).

Program

Vid statusbedömningen av BMA påvisades, som nämndes ovan, skador av olika art vilka måste åtgärdas. Val av tidpunkt för genomförandet av reparationsåtgärderna är beroende av skadornas karaktär. Åtgärder för att upprätthålla säker drift bör genomföras i närtid, medan åtgärder av skador som skulle kunna ha betydelse för den långsiktiga säkerheten kan utföras fram till dess att förvaret försluts. Nedan redovisas SKB:s program för reparationer av BMA samt övrig teknikutveckling som behöver genomföras före förslutning.

Hantering av genomgående sprickor

Genomgående sprickor noterades både i barriärväggarna och vid gjutfogarna i barriärens bottenplatta. Dessa sprickor riskerar att kortsluta funktionen hos det permeabla materialet runt barriärkonstruktionerna och behöver åtgärdas före förslutning. Metoder för detta innefattar exempelvis borring med efterföljande injektering med ett finkornigt bruk. Även om metoden är tämligen rättfram är möjligheterna att kontrollera resultat begränsade, vilket särskilt gäller bottenplattan. SKB undersöker i dag olika metoder för att åtgärda sprickor och kartlägger när reparationer bör genomföras.

Reparationer av skador orsakade av korrosion av ingjutet stål

De synliga skadorna på betongbarriärerna kan till största delen härledas till att kloridhaltigt grundvatten droppat ner på konstruktionerna och att kloridjoner då anrikats i betongens ytskikt. Med tiden har kloridjonerna trängt in till armeringsjärnen och upphävt den passivitet mot korrosion som annars skapas av betongporvattnets höga pH-värde. Korrosionsprocessen leder till att korrosionsprodukter bildas, vars volym är större än ursprungsmaterialets. Detta orsakar ett tryck inne i betongen och om dess draghållfasthet överskrider spjälkas bitar av betong bort och armeringen friläggs, se även avsnitt 20.2.19.

Reparation av betongkonstruktioner som drabbats av korrosion av ytarmeringen kan genomföras genom att den skadade betongen samt även en del av den friska tas bort. Detta kan göras med vattenbilning varefter ett nytt tämligen tjockt täcksikt av en tät betong pågjuts. Utöver att skapa en grov yta lämplig för pågjutning, har vattenbilningen även den fördelen att den rengör den befintliga armeringen från korrosionsprodukter och klorid. Detta ger en bra miljö för det pågjutna materialet. I och med att en tunnelduk installerats i BMA förväntas ingen ny ansamling av kloridjoner på betongen varför lagningen sannolikt kommer att bestå.

Förbättring av klimatet i anläggningen

Skador på betongkonstruktionerna i anläggningen orsakade av korrosion kan till stor del härledas till att klimatet i anläggningen är ogynnsamt för järn och stål. Kombinationen av en hög luftfuktighet och höga kloridhalter skapar en gynnsam miljö för korrosion.

Den tunnelduk som 2010 installerades i 1BMA skyddar mot dropp av inläckande grundvatten och ska stoppa ytterligare anrikning av kloridjoner i betongen. Den klorid som redan trängt in i betongen kommer att finnas kvar och påverka både armeringen och betongen. För åtgärd av detta krävs en genomgående reparation. Genom att installera klimatanläggningar kan luftfuktigheten minskas i anläggningen och effekten av den förhöjda kloridhalten i betongen reduceras.

Utveckling av kringgjutningsbruk och -metod för BMA

Som nämndes ovan finns problem både vad gäller val av kringgjutningsbruk och metod för kringgjutning av BMA (Pettersson och Thunberg 2012). Av den anledningen planeras ett nytt kringgjutningsbruk och en appliceringsmetod att utvecklas.

Kraven på material och metod ställs utifrån förväntad gasbildningshastighet i 1BMA och avstånd mellan kokillerna samt höjden på kokillstapeln och svällegenskaper hos avfallet. Den monolit som kommer att bildas i och med att avfallet kringgjuts måste vara tillräckligt stark för att motstå det ensidiga vattentrycket som uppstår i samband med att förvaret vattenmättas efter återfyllning och förslutning. Tidpunkten för genomförandet av detta utvecklingsarbete är inte fastlagt i detalj, men målsättningen är att det ska ske under de kommande tre åren.

8.1.4 Tekniska barriärer för lågaktivt avfall i utbyggd del av SFR

I den utbyggda delen av SFR planeras fyra bergssalar att uppföras för kortlivat lågaktivt avfall, 2-5BLA. I de planerade bergssalarna kommer avfall från avvecklingen av de svenska kärnkraftverken att deponeras. Avfallet, vilket huvudsakligen kommer att deponeras i ISO-containerar med olika dimensioner, utgörs främst av massor från nedmontering och rivning i form av stål, betong och sand.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 redovisades detta område endast kortfattat. SKB gjorde bedömningen att största delen av det avfall som kommer att placeras i ett utbyggt SFR kommer att vara lågaktivt och förvaras i förvarsdelen med konstruktioner motsvarande dagens bergssal för lågaktivt avfall. SKB framhöll även att förändringar av barriärerna i förvarsdelen och konditioneringen av avfallet kommer att ses över bland annat vad gäller möjlighet till återfyllning. Detta görs grundat på drifterfarenheter och erfarenheter från den senaste säkerhetsanalysen för SFR (SKB 2008a).

I sin granskning framförde SSM att förstärkningar av barriärfunktionen för kommande utbyggnad kan vara nödvändiga. Detta för att uppfylla det föreskrivna kravet på bästa möjliga teknik.

Nuläge

SKB har sedan Fud-program 2010 genomfört en rad utredningar kring val av barriärutformning för bergssalarna 2–5BLA. Ett flertal alternativa utformningar har diskuterats, var och en med sina fördelar och utmaningar. I arbetet, vilket ännu inte är slutfört, har dagens lösning för 1BLA jämförts med utformningar liknande dem i 1BMA samt alternativet med att fylla avfallsbehållarna med cementbruk.

Den tekniska lösning som i dag används för 1BLA kan anses välkänd och skulle även kunna användas i 2–5BLA.

Ett av de alternativ som utretts utgör en 1BMA-liknande konstruktion som erbjuder både strålskydd under drift och förbättrade barriäregenskaper efter förslutning. Denna utformning innebär dock ett antal tekniska utmaningar där utformning för att motstå ett ensidigt vattentryck motsvarande 150 meter vattenpelare upplevs som den svåraste. Detta kan hanteras genom att väggarna dimensioneras för att stå emot detta tryck eller genom att avfallscontainrarna fylls med betong. Alternativt kan betongkonstruktionerna byggas så att vatten kan rinna in i förvaret på ett kontrollerat sätt och därmed skapa ett mottryck under den mest kritiska fasen. Av dessa alternativ har kontrollerat vatteninflöde befunnits vara det mest lovande.

Det tredje alternativet som utretts är att fylla avfallsbehållarna med ett cementbruk för att stabilisera avfallet och erbjuda en stor sorptionsyta i avfallsbehållarna. Inte heller denna lösning är fri från utmaningar, då behållarna måste fyllas så att bruk och avfall blandas homogent och att inga stora tomrum lämnas genom vilka vattnet kan flöda. Alternativet medför även att andelen reaktiva metaller behöver hållas nere.

Program

Utformning för 2–5BLA redovisas i ansökningarna om att få bygga ut SFR baserat på ett utökat underlag rörande den långsiktiga säkerheten samt säkerheten under drift.

8.1.5 Tekniska barriärer för medelaktivt avfall i utbyggd del av SFR

I den planerade bergssalen för kortlivat medelaktivt avfall, 2BMA, kommer avfall från avvecklingen av de svenska kärnkraftverken att deponeras. Avfallet, vilket huvudsakligen kommer att deponeras i stål- och betongkokiller, utgörs främst av massor från nedmontering och rivning i form av stål och betong. Den beräknade deponeringsvolymen i 2BMA har uppskattats till totalt 22 000 kubikmeter.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Teknikutvecklingen för de tekniska barriärerna för 2BMA beskrevs endast kortfattat i Fud-program 2010. SSM ställde sig vid sin granskning positiv till de utredningar som planerades, till exempel avseende komplettering av ett framtida 2BMA med en bentonitbarriär.

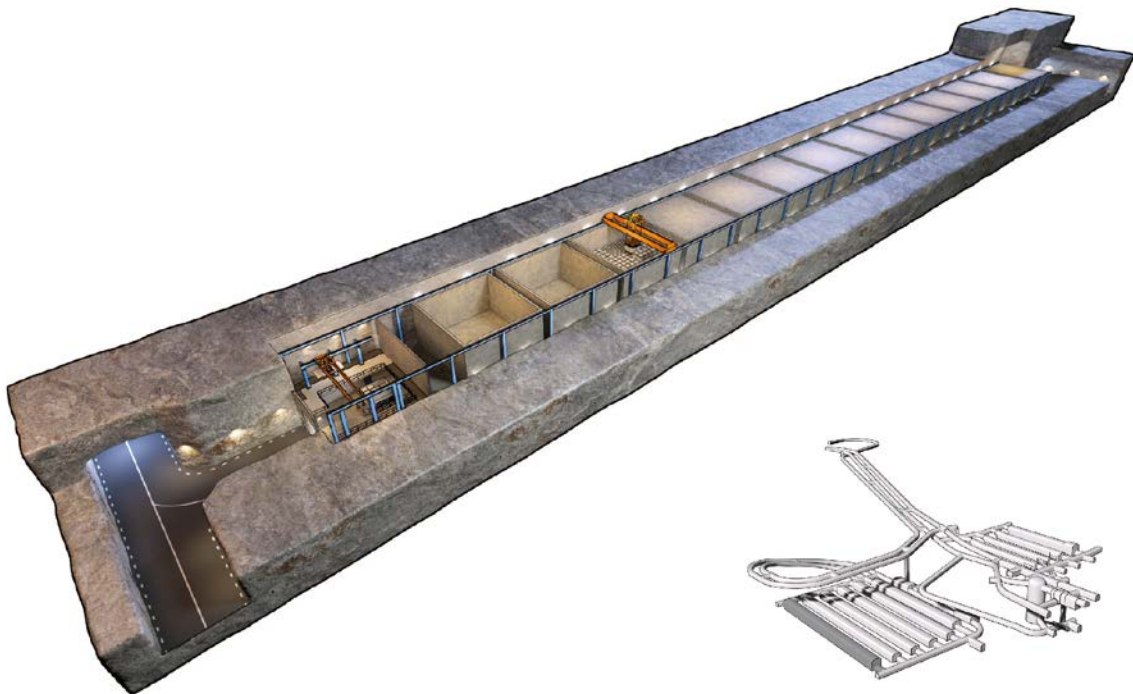
Nuläge

Sedan Fud-program 2010 har SKB låtit genomföra en mängd utredningar kring möjliga utformningar av det framtida 2BMA. Detta är ett arbete som tagit tillvara många erfarenheter från det undersökningsprogram som genomförts i den befintliga anläggningen. Av de viktigaste kan följande nämnas:

- Separera traversbanan från de tekniska barriärerna.
- Öka utrymmet mellan kokiller för att underlätta kringgjutning.
- Dela upp den långa förvarskonstruktionen i fristående sektioner, för att minska risken för sprickbildning i samband med uppförandet.
- Uppföra konstruktionen i oarmerad betong.
- Gjuta golv och väggar samtidigt för att begränsa tvång och sprickbildning vid övergången mellan dessa.
- Undvika att inläckande grundvatten droppar på de tekniska barriärerna.

Utöver detta uppkommer frågeställningar kopplade till val av betongsammansättning för barriärerna, temperaturutveckling under uppförande och metod vid kringgjutning.

Med nämnda förutsättningar och med hjälp av erfarenheter från 1BMA har det beslutats att uppföra de tekniska barriärerna i 2BMA i form av kassuner. Det innebär fristående betongkonstruktioner med ungefärliga dimensioner 16×16×8 meter och med ett avstånd på cirka 1,5 meter mellan dessa, figur 8-2. De fristående betongkonstruktionerna planeras att uppföras i oarmerad betong. Storleken på respektive kassun är anpassad för att ge ett avstånd mellan varje fyrkokill på cirka 100 millimeter för att möjliggöra kringgjutning. Traversbanan kommer att placeras på pelare vilka är skilda från barriärkonstruktionerna. Med de avfallsmängder som antas vara aktuella för förvaring i 2BMA kommer 14 kassuner att behövas vilket ger en förvarssal med en totallängd på cirka 275 meter.



Figur 8-2. 2BMA – Bergssal för medelaktivt avfall i utbyggd del av SFR.

Program

Ett antal förbättringsmöjligheter har enligt ovan identifierats inför uppförandet av det nya 2BMA jämfört med 1BMA. Flera av dessa kräver teknikutvecklingsinsatser för att kunna realiseras. Nedan redovisas SKB:s teknikutvecklingsprogram för förvardsdelen 2BMA.

Gjutning av barriärer i armeringsfri betong med de dimensioner som anges ovan är en uppgift som kräver noggranna förberedelser. SKB planerar därför att uppföra en sådan konstruktion i stor skala där metod, utförande och resultat verifieras. Kontrollprogram för konstruktion och utförande ska utvecklas för att säkerställa att kravspecifikationen uppfylls. Detta arbete kommer att startas i samband med att utvecklingen av betongsammansättning för kassunerna har påbörjats.

För att säkerställa att krav på förvarets långsiktiga säkerhet uppfylls behöver betongkonstruktionen innehålla så få och så små sprickor som möjligt. Metoderna för att uppnå detta är flera men alla går inte att kombinera med övriga konstruktionskrav. En noggrant utformad betong krävs, med i första hand mycket låg krympning, god bearbetbarhet och täthet. Detta arbete har initierats och problemformulering pågår. En utvecklingsplan ska tas fram.

Kringgjutning i 2BMA tjänar huvudsakligen två syften, det ena är att tillsammans med avfallskollina skapa ett mothåll mot det vattentryck som uppkommer vid förvarets återmättnad och det andra är att hålla nere det advektiva vattenflödet runt avfallsbehållarna.

Det kringgjutningsbruk som används i silon är anpassat för goda flytegenskaper i 70 millimeter breda spalter. Av denna anledning och med stöd av genomförda studier (Pettersson och Thunberg 2012) har det beslutats att avstånden mellan varje fyrkokill i 2BMA ska vara 100 millimeter för att befintligt kringgjutningsbruk ska kunna utnyttjas.

Hantering av detta bruk kräver viss försiktighet på grund av separationskänslighet. Därför bör det inte pumpas hur som helst eller släppas från en höjd motsvarande hela kokillstapeln.

Om lösningen innebär att utveckla metoden eller att justera receptet blir en fråga för en framtida utredning att klargöra. I första skedet ska kravspecifikation kartläggas samt teknikutveckling ske med stöd av det arbete som utförs för kringgjutningsbruk för 1BMA.

8.1.6 Tekniska barriärer för reaktortankar i utbyggd del av SFR

I den utbyggda delen av SFR projekteras för en bergssal för deponering av hela BWR-reaktortankar, kallad BRT, se figur 8-3. PWR-tankarna ska slutförvaras i SFL och kommer att mellanlagras till dess att SFL har tagits i drift.

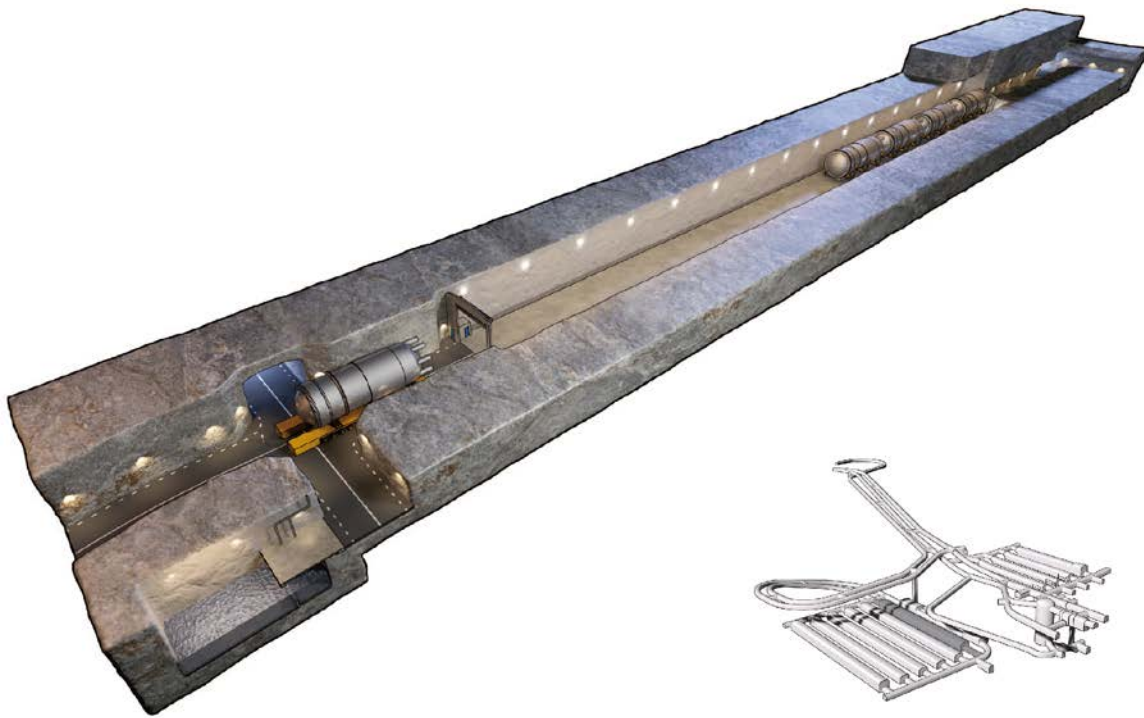
Utformningen av bergssal BRT baseras på att reaktortankarna placeras i en lång rad i en bergssal som är cirka 14 meter bred, 12 meter hög och upp till 210 meter lång. Den tekniska barriären utgörs av betong då reaktortankarna kringgjuts. Därefter fylls utrymmet mellan kringgjutningen och bergssalens väggar med ett genomsläppligt material såsom makadam. För att minimera tomrumsvolymer i förvaret finns även möjlighet att fylla varje enskild reaktortank med ett cementbaserat bruk. Den beräknade avfallsvolymer för BRT har uppskattats till 20 000 kubikmeter.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 redovisades inget arbete kopplat till bergssalen BRT. I sin granskning framförde SSM inga synpunkter på detta.

Nuläge

SKB har sedan Fud-program 2010 genomfört en rad utredningar kring val av barriärutformning för förvarssalen BRT och ett flertal alternativa lösningar har diskuterats, var och en med sina fördelar och utmaningar. Med hänsyn tagen till fördelarna med en miljö där korrosionshastigheten kan hållas låg, har det beslutats att låta cementbaserade material utgöra de tekniska barriärerna i denna bergssal. Exakt utformning och metod för uppförande är ännu inte helt klarlagd.



Figur 8-3. BRT – Bergssal för reaktortankar i utbyggd del av SFR under drift.

Program

SKB:s program för utveckling av tekniska lösningar för BRT innefattar ett antal områden varav de viktigaste är:

- Utredning av behov av igjutning i reaktortankarna.
- Utveckling av bruk och metod för igjutning i reaktortankarna om det ska genomföras.
- Utformning av metod för utförande av kringgjutning.
- Utveckling av metod för att undvika att reaktortankarna flyter upp vid kringgjutning av bergssalen.

8.1.7 Förslutning

När driften av SFR avslutas och åtgärder enligt avvecklingsplan är genomförda, ska samtliga delar av underjordsanläggningen förslutas. Det innebär att underjordsanläggningen ska fyllas med material som har till syfte att minska radionuklidernas rörlighet samt förhindra tillträde till avfallet. Förslutning omfattar återfyllning av bergssalar, uppförandet av pluggar bestående av mekaniska pluggar och hydrauliskt täta sektioner samt återfyllning av nedfartsramper och tunnelsystem. De olika delarna av SFR kommer att återfyllas på olika sätt och med olika material för att uppnå den önskade helhetsfunktionen.

För de ingående komponenterna i förslutningen kommer naturliga material som är mekaniskt och kemiskt stabila över lång tid att användas.

Förslutningsarbetet förutsätts vara ett arbete som utförs under relativt kort tid där förvarstrymmen som blir fyllda med avfall ska stå öppna till dess att hela SFR försluts. Förslutningstakten är beroende av vattenflöden och tryckfördelning, vilket innebär att djupare studier av dessa parametrar kommer att utföras. Att utveckla en strategi för förslutning av SFR är ett pågående arbete som kommer drivas vidare.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

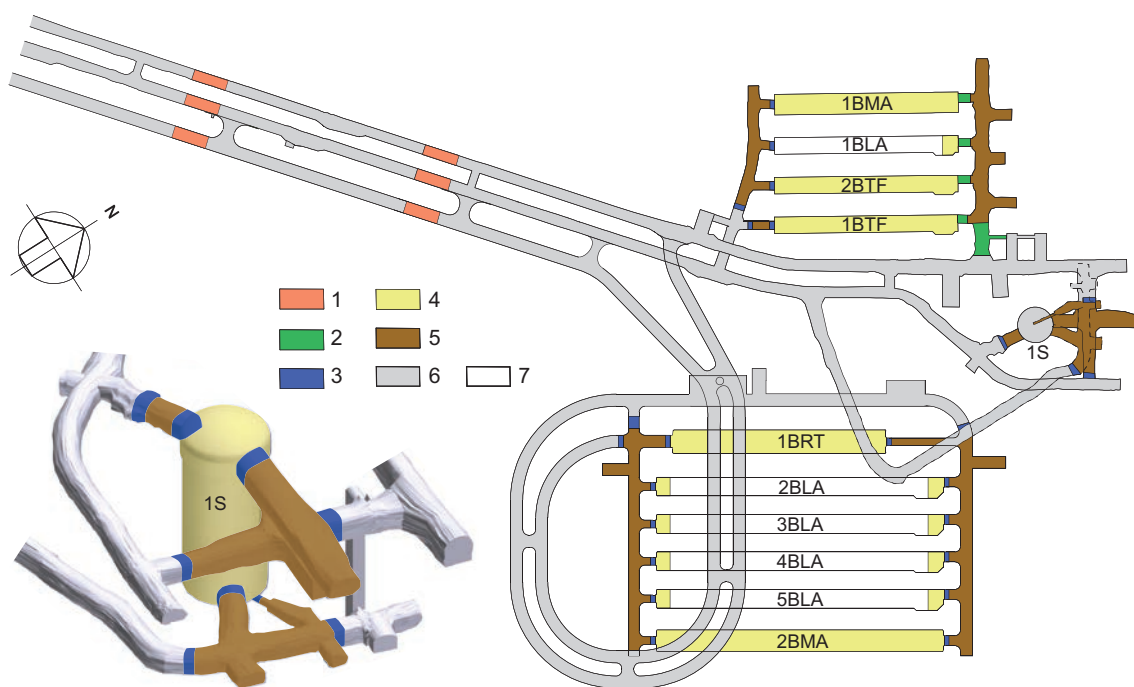
I Fud-program 2010 beskrevs förslutningsstrategin endast översiktligt och SKB angav där att man avsåg att utveckla strategin för förslutning av den befintliga anläggningen samt ta fram en strategi för den utbyggda delen av anläggningen. I sin granskning framförde SSM inga synpunkter på detta.

SSM har tidigare i sin granskning av säkerhetsanalysen 2008 (SKB 2008a) efterfrågat en mer entydig förslutningsstrategi. SKB har fram till i dag arbetat med att förtydliga hur förslutningen ska utföras. Detta arbete kommer att beskrivas i en förslutningsplan för SFR, som kommer att ingå i ansökan enligt kärntekniklagen för att bygga ut SFR. I förslutningsplanen kommer referensutformningen för förslutningen att beskrivas.

Nuläge

Sedan redovisningen av Fud-program 2010 har SKB arbetat med en konceptuell förslutningsstrategi för ett utbyggt SFR. I figur 8-4 ges ett exempel på hur förslutningen kan utformas. Utformningen för förslutningen kommer att redovisas i en förslutningsplan som kommer att ingå i ansökan enligt kärntekniklagen för att bygga ut SFR.

I anslutningen mellan förvarsutrymmena och de angränsande tunnlarna anläggs pluggar. Samtliga pluggar utgörs av två huvudkomponenter, mekaniska pluggar och en hydraulisk tät sektion bestående av bentonitlera. Pluggarnas syfte är att minska vattenflödet genom bergssalarna. När bentonitlera expanderar vid vattenmättnad, behövs ett mothåll för att upprätthålla dess densitet och låga hydrauliska konduktivitet. Den mekaniska pluggen kan utgöras av antingen betong eller av övergångsmaterial som vidarebefordrar svälltrycket från den täta sektionen till återfyllningsmaterial i angränsande tunnelsystem. Den senare lösningen benämns jorddammsplugg.



Figur 8-4. Referensutformning av förslutning för SFR inklusive utbyggd del med detaljvy av silon. 1) Pluggar i nedfartsramper. 2) Övergångsmaterial. 3) Mekanisk plugg av betong. 4) Återfyllningsmaterial av makadam. 5) Hydrauliskt tät sektion av bentonit eller bentonitblandning. 6) Återfyllningsmaterial i nedfartsramper och tunnelsystem. 7) Ej återfyllda utrymmen.

Program

SKB planerar för en fortsatt teknikutveckling av betongpluggar för att åstadkomma en robust utformning som inte kräver omfattande bergarbeten. Ett alternativ som ska utredas är att använda betongpluggar som tar lasten i friktion mot bergväggen. Då den slutgiltiga layouten för utbyggnaden bestämts kan eventuellt en mer noggrann dimensionering av varje betongplugg behöva initieras.

SKB avser att utveckla konceptet för jorddammspluggen och övergångsmaterialet. Jorddammspluggens utveckling över tiden behöver studeras och analyseras. Det är till stor del arbete med beräkningar, parameterstudier samt modellering som behöver genomföras.

En mer detaljerad analys av hur bentoniten i de täta sektionerna ska utformas och installeras behöver genomföras. Möjligheten att uppnå tillräckligt hög densitet i de hydrauliskt täta sektionerna med bentonitpelletar eller granulerad bentonit kommer att utredas.

8.1.8 Borrhålsförslutning

Det finns ett stort antal undersökningsborrhål i området vid SFR. Vissa borrhål har redan förslutits enligt tidigare praxis medan andra fortfarande står öppna. Det bedöms att samtliga borrhål som i dag är öppna behöver förslutas.

Syftet med förslutningen är att återställa berggrundens hydrauliska egenskaper så att borrhålen inte bildar en flödesväg för grundvatten och därmed inte heller bidrar till en ökad spridning av radionuklider till markytan eller havsbotten. Tekniken för borrhålsförslutningen bygger på teknik hämtad från Kärnbränsleförvaret och kommer att behöva anpassas till förutsättningarna vid SFR.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 beskrevs förslutningsstrategin översiktligt. SKB angav att man avsåg att utveckla strategin för förslutning av den befintliga anläggningen samt att ta fram en strategi för den utbyggda delen av anläggningen. I sin granskning framförde SSM inga synpunkter på detta.

Nuläge

SKB har analyserat scenarier för Kärnbränsleförvaret där borrhål inte erhåller samma hydrauliska konduktivitet som omgivande berg. Dessa analyser antyder att kraven på borrhålsförslutningens täthet kan lättas (Luterkort et al. 2012).

Program

Borrhålsförslutningen vid SFR bygger på samma koncept som för Kärnbränsleförvaret, vilket innebär att borrhålet till stor del fylls med kompakterad bentonit. För att bentoniten ska kunna installeras under kontrollerade former krävs preparering av såväl borrhål som bentonit. Det finns fortfarande behov av utveckling av metoderna för borrhålsförslutning. SKB avser därför att se över konceptet och anpassa det för användning i SFR. Det behövs även en utredning av vilka borrhål som ska förslutas innan utbyggnaden av SFR genomförs.

8.2 Slutförvar för långlivat avfall

Teknikutvecklingen för SFL omfattar bland annat metoder och tekniska lösningar för konditionering av avfall, behållare, tekniska barriärer för slutförvaret och förslutning.

De förvarsutformningar för ett geologiskt slutförvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall som SKB arbetar med beskrivs i avsnitt 8.2.1. Den serie av behållare som SKB har utvecklat på konceptnivå för att lasta olika typer av långlivat låg- och medelaktivt avfall presenteras i avsnitt 8.2.3. Utredning rörande tekniska lösningar för segmentering av BWR-styrstavar redovisas i avsnitt 8.2.5.

8.2.1 Tekniska barriärer

Utgångspunkten för SKB:s arbete är att säkerställa säkerheten för människa och miljö genom att slutförvara det radioaktiva avfallet på ett långsiktigt säkert sätt. Olika typer av avfall behöver slutförvaras på olika sätt för att uppnå detta. Denna princip tillämpas genom att SKB dels har olika förvar för olika typer av avfall, exempelvis ett förvar för använt kärnbränsle, dels genom att olika förvarsdelar inom ett och samma förvar tilldelas olika barriäregenskaper, såsom i SFR. I enlighet med detta kommer de olika förvarsutrymmen som planeras för SFL att anpassas för specifika avfall.

I en konceptstudie för SFL har SKB utvecklat flera olika barriärkoncept för att kunna utvärdera deras långsiktiga säkerhetsfunktion, miljöpåverkan, tekniska genomförbarhet och kostnad. Vid konceptstudiens slut kommer barriärkoncepten att jämföras för att identifiera lämpliga lösningar för respektive avfallsfraktion. De barriärkoncept som bedöms ha goda förutsättningar att uppfylla säkerhetskraven kommer att utvärderas mellan 2014 och 2016 med avseende på långsiktig säkerhet. Först efter genomförd säkerhetsvärdering kommer huvudspår att väljas.

För att möjliggöra en jämförande bedömning av barriärkoncepten har dessa utvecklats till en likvärdig konceptuell nivå. Respektive barriärkoncept har utformats som ett enskilt förvarsutrymme för att utvärdera faktorer kopplade till byggbarhet och drift. Fyra olika barriärkoncept redovisas i följande avsnitt, där tre utgör enskilda tekniska barriärer – av betong, bentonit respektive bergkross/grus – och den fjärde är en kombination av de tre barriärerna till en teknisk multibarriär.

I redovisningen av de tre barriärerna betong, bentonit respektive bergkross/grus har en bergssal valts som geometrisk utformning av förvarsutrymmet, men andra geometriska former, som exempelvis en silo, kan inte uteslutas. För multibarriärförvaret har en silokonstruktion valts, men även i det fallet kan en bergssal vara aktuell.

En förutsättning för slutförvaret är en plats med lämplig berggrund för att konstruera en tillräckligt stor bergssal eller silo. I studien har ett förvarsdjup på 300–500 meter antagits.

Förvarsutformning baserad på teknisk barriär av betong

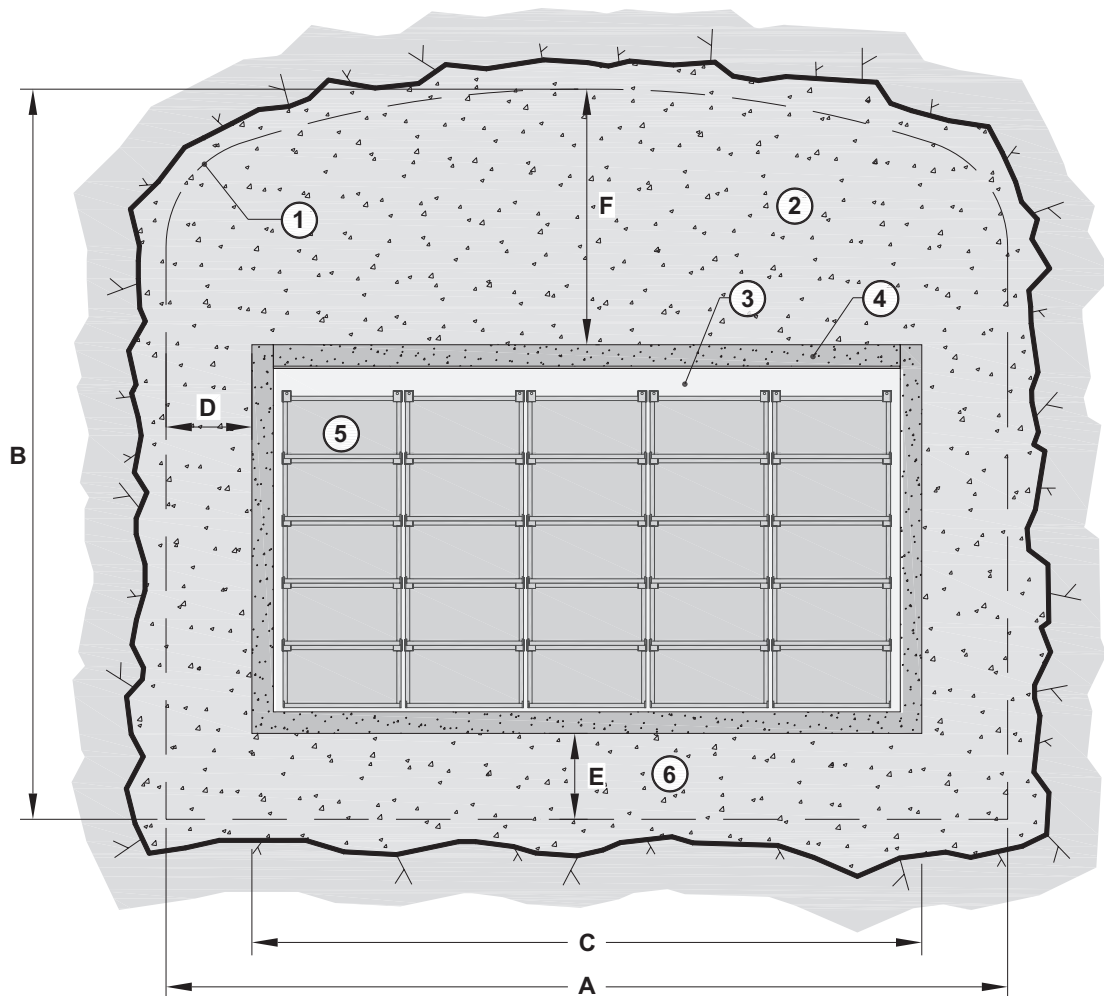
En teknisk barriär av betong i ett geologiskt förvar syftar både till att begränsa grundvattenflödet genom avfallet och att begränsa diffusion av ämnen till och från avfallet. Genom att använda cement och betong skapas en barriär mot advektivt flöde, vilket gör diffusion till den huvudsakliga processen för uttransport av ämnen från avfallet. Samtidigt är diffusionshastigheten i cement och betong låg för flera viktiga radionuklider liksom sorptionen god. Vidare ger betongen en alkalisk miljö i förvaret, vilket skapar ett passiverande skikt på metalliskt avfall. Det leder i sin tur till en lägre korrosionshastighet. Genom ett högt pH i förvaret begränsas således upplösningshastigheten av de radionuklider som sitter bundna i metallen.

I bergssalen uppförs en betongstruktur med betongväggar som erbjuder strålskärning under drift, se figur 8-5. Förvaret är uppdelat i olika fack på vilka betongplank kan läggas efter deponering av avfall i aktuellt fack. Storleken på facken är ungefär 10×15 meter. Tjockleken på betongväggarna är cirka 0,5 meter. För deponering av avfall används en travers vars bana vilar antingen direkt på berget eller på separata pelare. Tunnelduk installeras för att leda bort dränagevattnet och skydda betongstrukturerna under drift. Den mer detaljerade utformningen av förvarsutrymmet kan bygga på de lösningar som utvecklats för 2BMA i SFR, med fristående oarmerade betongkassuner som tillverkas genom hängformsgjutning.

Betongförvaret återfylls med betong efter avslutad deponering, det vill säga hela den utsprängda bergvolymen fylls med betong. Det ger en betongmonolit utan tomrum som omsluter avfallet.

Säkerhetsfunktioner och utsläppsbegränsande faktorer är:

- Begränsat flöde av grundvatten genom betongen.
- Begränsad diffusion genom betongen.
- Sorption av radionuklider.
- Låg korrosionshastighet för metaller.



Figur 8-5. Genomsnitt av bergssal med betongbarriär. 1) Teoretisk tunnelkontur. 2) Oarmerad betong. 3) Kringgjutning. 4) Betongkonstruktion för drift (0,5 m). 5) Avfallsbehållare. 6) Oarmerad betong. Mått: A = 20 m, B = 17 m, C = 16 m, D = 2 m, E = 2 m, F = 5–10 m.

Barriärer i förvaret:

- Väggar, golv och lock i fackstruktur: betong (armerad eller oarmerad), tjocklek cirka 0,5 meter.
- Fyllning av tomrum: kringgjutningsbruk mellan behållare samt mellan behållare och fackväggar, tjocklek cirka 0,1 meter.
- Återfyllning mellan fackstruktur och berg (sidor och botten): betong cirka två meter.
- Återfyllning ovanför fackstruktur: betong 5–10 meter.

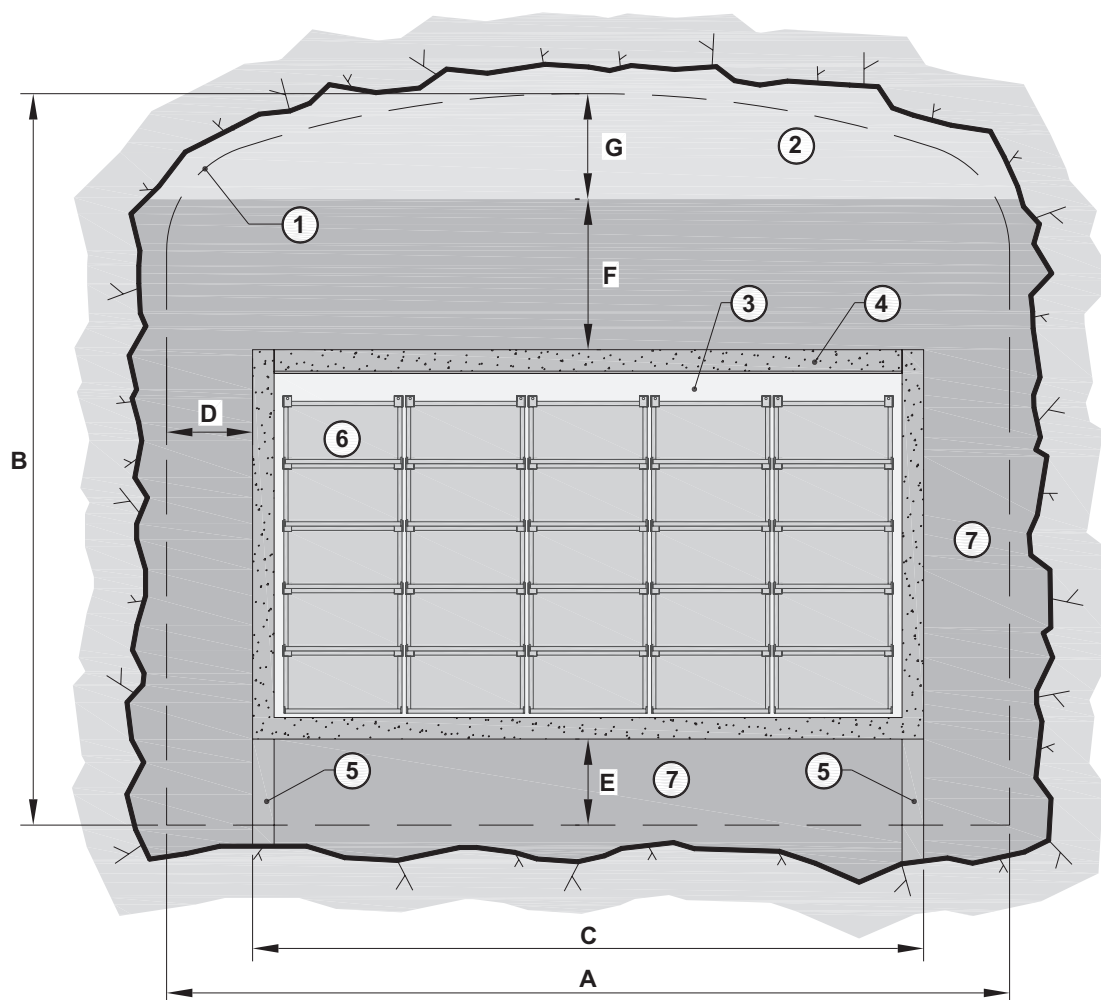
Den långsiktiga säkerheten är bland annat beroende av hur väl betongbarriärerna begränsar det advektiva flödet av grundvatten genom avfallsvolymer. Den hydrauliska konduktiviteten genom betongen är starkt beroende av förekomsten av sprickor i betongen. Armeringskorrosion är generellt en vanlig orsak till att betong spricker. För att minska risken för sprickor övervägs en oarmerad betongkonstruktion i 2BMA för det utbyggda SFR (se avsnitt 8.1.5). En oarmerad konstruktion klarar avsevärt mindre last. Under vattenmättnadsfasen, efter förslutning, kommer det ensidiga hydrostatiska vattentrycket i berget på 300–500 meters djup att vara 3–5 megapascal (MPa). En betongkonstruktion kommer att ställa krav på att lasten kan tas upp av avfallet, dess förpackningar och eventuell kringgjutning för att inte betongkonstruktionen ska tryckas sönder. I takt med att förvaret vattenmättas utjämnas tryckskillnaden. För en oarmerad konstruktion kommer högre krav att behöva ställas på avfallet och dess förpackning jämfört med en armerad konstruktion, vilket måste ställas i relation till den förväntade förbättringen av långsiktig säkerhet.

En väsentlig avfallsfraktion utgörs av metalliskt avfall såsom hårdkomponenter. Betongförvaret ger en alkalisk miljö, vilken ger en lägre korrosionshastighet för stål och rostfritt stål än en mer neutral miljö. Korrosionen av metalliskt avfall ger upphov till gas. Den gas som genereras under förvarsskedet ska kunna lämna förvaret utan att förvarets barriärer påverkas negativt. Tekniska lösningar för att hantera gastransporten genom barriären kan behöva utvecklas.

Förvarsutformning baserad på teknisk barriär av bentonit

En teknisk barriär av bentonit i ett geologiskt förvar syftar till att begränsa grundvattenflödet genom avfallet, och att begränsa diffusion av ämnen till och från avfallet. Genom användning av stora mängder av svällande bentonit begränsas grundvattenflödet och lämnar diffusion som huvudsaklig process för uttransport av ämnen från avfallet.

I bergssalen skapas en betongstruktur med en betongplatta placerad på pelare. Från plattan reses betongväggar vars primära syfte är att ge strålskärning under drift, se figur 8-6. Konstruktionen är uppdelad i olika fack på samma sätt som i bergssalen med barriär av betong, och deponering av avfall sker också på samma sätt med hjälp av en travers. Betongkonstruktionens funktion begränsas till driftsperioden, som bärare av avfall och som strålskydd. Ingen bentonit installeras före förslutningsskedet.



Figur 8-6. Genomsnitt av bergssal med bentonitbarriär. 1) Teoretisk tunnelkontur. 2) Bentonitpelletar. 3) Kringgjutning. 4) Betongkonstruktion för drift (0,5 m). 5) Granitpelare. 6) Avfallsbehållare. 7) Bentonitblock. Mått: A = 20 m, B = 17 m, C = 16 m, D = 2 m, E = 2 m, F = 3–4 m, G = 2–3 m.

Senast vid förslutning kringgjuts avfallsbehållarna med kringgjutningsbruk och betongplank läggs över facken. Bentonitblock placeras under betongstrukturen, liksom på sidorna och ovanpå. Resterande utrymme, mellan bentonitblocken i väggarna och bergssalens väggar liksom överst i förvarsutrymmet, fylls med bentonitpelletar.

Genom en begränsad användning av betong i relation till mängden bentonit bedöms betongens påverkan på bentonitens svällande egenskaper vara begränsad.

Säkerhetsfunktioner och utsläppsbegränsande faktorer är:

- Begränsat flöde av grundvatten genom bentoniten.
- Begränsad diffusion genom bentoniten.
- Sorption av radionuklider.

Betongkonstruktionen fyller viktiga funktioner under drifttiden, men tillskrivs i utvärderingen av koncepten inte någon funktion för den långsiktiga radiologiska säkerheten.

Barriärerna i förvaret är:

- Fyllning av tomrum: kringgjutningsbruk mellan behållare samt mellan behållare och fackväggar, tjocklek cirka 0,1 meter.
- Återfyllning sidor och botten: bentonitblock med en torrdensitet om 1 600–1 700 kilo per kubikmeter (kg/m^3), cirka två meter.
- Återfyllning ovanför: bentonitblock med en torrdensitet om 1 600–1 700 kg/m^3 , 3–4 meter.
- Överfyllning: bentonitpelletar med en torrdensitet om cirka 1 000 kg/m^3 .

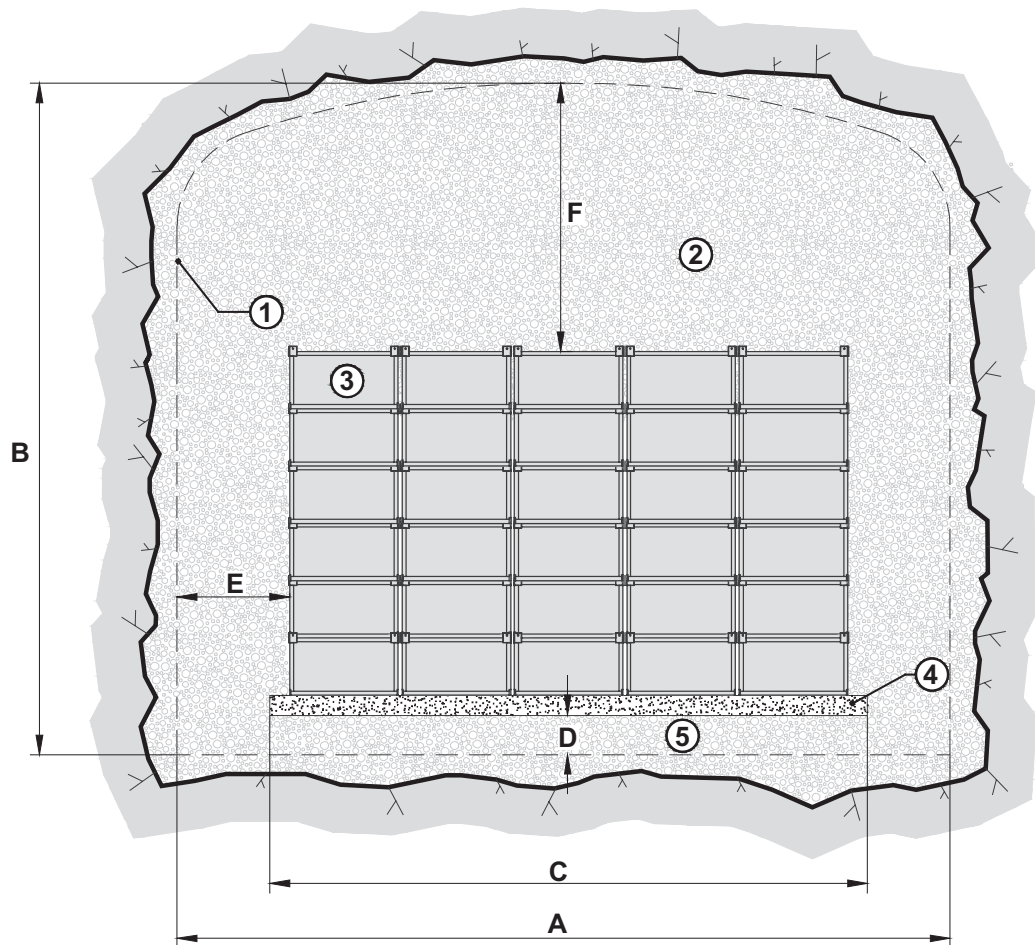
Som utgångspunkt för arbetet med dimensionering av barriärerna ansätts en torrdensitet för bentoniten om 1 600–1 700 kg/m^3 . Block av högkvalitativ bentonit kan då tillverkas med standardmetoder. Den återstående tomma volymen, främst mellan block och bergssalens väggar, kommer att fyllas med bentonitpelletar som har en lägre genomsnittlig torrdensitet. Bentonitblocken staplas till en bredd av cirka två meter och det återstående avståndet till bergssalens väggar bedöms till i genomsnitt cirka 0,2 meter. Denna volym fylls med pelletar med en torrdensitet om cirka 1 000 kg/m^3 . Om den genomsnittliga torrdensiteten hos blocken är 1 700 kg/m^3 blir den genomsnittliga densiteten vid väggarna 1 550 kg/m^3 . Ungefär samma förhållande förväntas mellan block och pelletar för återfyllning av volymen under avfallet. Ovanför avfallet är den höjden som är fylld med pelletar avsevärt större – i grundutformningen 2–3 meter. Det innebär att den genomsnittliga torrdensiteten blir ungefär 1 300 kg/m^3 . Densitetsgradienten i volymen förväntas bestå även efter homogenisering. Skillnaden i svälltryck i volymen till följd av densitetsvariationen behöver utredas ytterligare.

Den fortsatta utvecklingen av bentonitbarriärer behöver även beakta hur gasutvecklingen i avfallet ska hanteras. Att installera ventiler som tillåter gas att passera den mättade bentoniten utan att öka vattentransporten genom avfallet kan bli nödvändigt. Ett annat alternativ är att undersöka hur låg densiteten i bentoniten behöver vara för att tillåta att gas transporteras genom leran utan negativa effekter, samtidigt som den är tillräckligt hög för att säkerställa barriärens långsiktiga säkerhetsfunktion. Driftskonstruktionernas utformning behöver utredas mer i detalj för att begränsa betongens påverkan på bentonitens långsiktiga funktion.

Förvarsutformning baserad på teknisk barriär av bergkross/grus

En teknisk barriär av bergkross/grus i ett geologiskt förvar syftar till att begränsa grundvattenflödet genom avfallet genom att skapa en hydraulisk bur runt avfallet. Genom att använda stora mängder av ett högpermeabelt material som bergkross/grus skapas en transportväg för grundvattnet runt avfallet, vilket begränsar det advektiva flödet genom avfallet och därmed uttransport av ämnen från avfallet.

I bergssalen läggs en betongplatta som vilar på en bädd av bergkross/grus, se figur 8-7. Denna bädd utgör en del av den hydrauliska burens. Expansionsfogar anläggs i betongplattan för att tillåta mindre rörelser. Tak och väggar i bergssalen tätas med sprutbetong. Även i denna lösning används en travers vars bana vilar antingen direkt på berget eller på separata pelare för deponering av avfall.



Figur 8-7. Genomsnitt av bergssal med barriär av bergkross/grus. 1) Teoretisk tunnelkontur. 2) Bergkross. 3) Avfallsbehållare. 4) Betongplatta (0,5 m). 5) Sprängsten och makadam. Mått: A = 20 m, B = 17 m, C = 15 m, D = 1 m, E ≈ 2,5 m, F = 5–10 m.

Vid förslutning fylls utrymmet mellan avfallet och berget med bergkross/grus. Betongplattans funktion begränsas till driftsperioden, som bärare av behållare.

Säkerhetsfunktioner och utsläpps begränsande faktorer är:

- Begränsat flöde av grundvatten genom avfallet.
- Sorption av radionuklider.

Barriärer i förvaret utgörs av bergkross/grus med jämn storleksfördelning och en hydraulisk konduktivitet om 10^{-5} meter per sekund eller mer:

- Bädd av bergkross/grus under avfallet: en meter.
- Återfyllning med bergkross/grus på sidorna: cirka 2,5 meter.
- Återfyllning med bergkross/grus ovanför: 5–10 meter.

Förvarsutformning baserad på teknisk multibarriär av betong/bentonit/bergkross

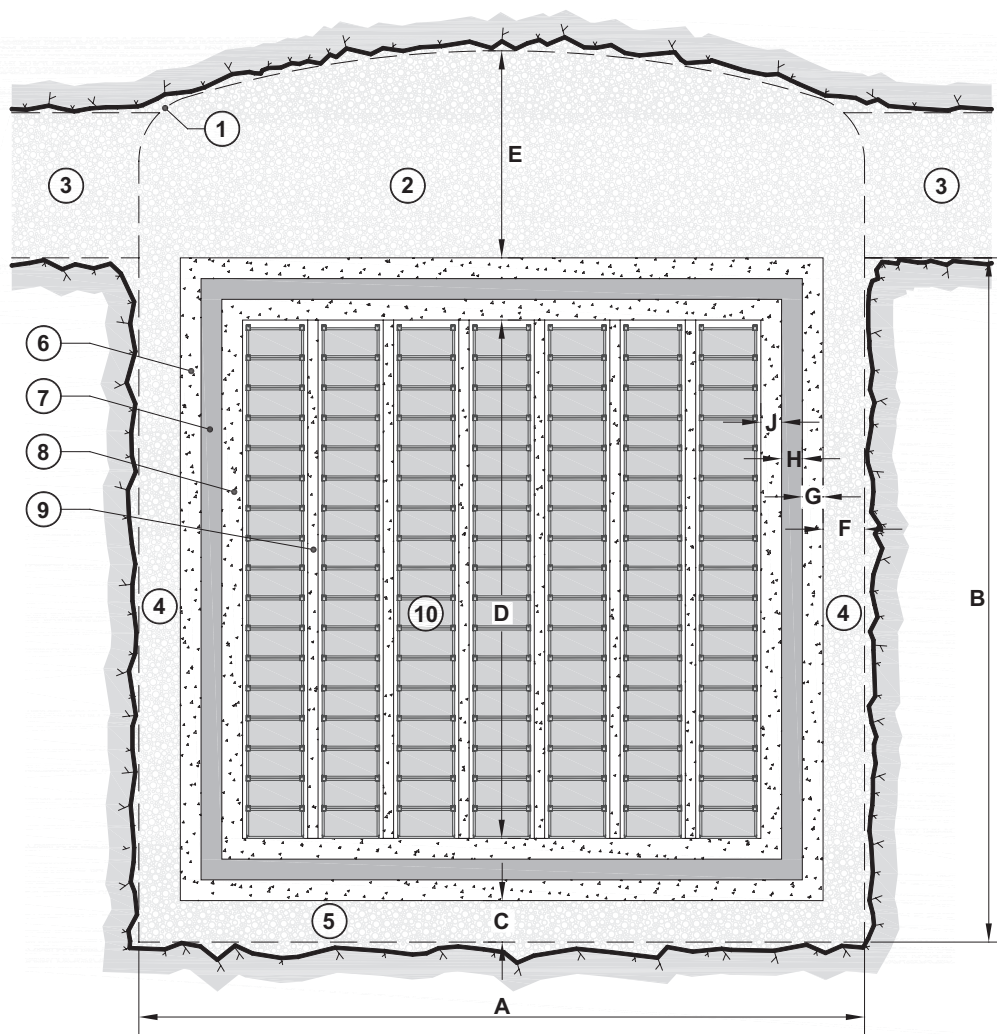
Teknisk multibarriär av betong, bentonit och bergkross i ett geologiskt förvar syftar till att begränsa grundvattenflödet genom avfallet, och vidare att begränsa diffusion av ämnen till och från avfallet. Detta åstadkoms genom en kombination av en hydraulisk bur (bergkross), ett material med låg permeabilitet (bentonit) och ett material med låg diffusivitet (betong).

Den geometriska utformningen är en dubbelväggig cylinder av betong som placeras i kristallint berg. Utrymmet mellan betongväggarna fylls med bentonit längs mantelytan och en blandning av sand och bentonit längs cylinderns basyta. Utrymmet mellan den yttre betongcylindern och berget fylls med bergkross. Tjockleken på betongväggarna är en meter, och bentonitlagret är också ungefär en meter. Vid förslutning placeras ett lock av betong/bentonit/betong på silon och utrymmet ovanför silon återfylls med bergkross. Figur 8-8 visar en genomskärning av en silo med barriärer av betong, bentonit och bergkross.

Det inre av silon är uppdelat i separata schakt på samma sätt som dagens silo i SFR. Storleken på varje schakt är cirka 2,8×2,8 meter för att lämna ett visst utrymme mellan behållare och vägg. Tjockleken på de inre betongväggarna är cirka 0,5 meter. För deponering av avfall används en travers på samma sätt som i silon i SFR. Tunnelduk installeras för att leda bort dränagevattnet och skydda betongstrukturerna under drift.

Säkerhetsfunktioner och utsläpps begränsande faktorer är:

- Begränsat flöde av grundvatten genom avfallet, då flödet kanaliseras genom en hydraulisk bur.
- Begränsat flöde av grundvatten genom betongen och bentoniten.
- Begränsad diffusion genom betongen och bentoniten.
- Sorption av radionuklider.



Figur 8-8. Genomskärning av silo med barriärer av betong, bentonit och bergkross. 1) Teoretisk berggrumskontur. 2, 3, 4, 5) Bergkross. 6) Armerad betong. 7) Bentonitblock. 8) Betong. 9) Mellanvägg i betong (0,5 m). 10) Avfallsbehållare. Mått: A = 35 m, B = 33 m, C = 2 m, D = 25 m, E = 5–10 m, F = 2 m, G = 1 m, H = 1 m, J = 1 m.

Barriärer i förvaret är:

- Fyllning av tomrum: kringgjutningsbruk mellan behållare och schaktväggar, tjocklek cirka 0,1 meter.
- Inre betongsilon: armerad eller oarmerad betong, tjocklek cirka en meter.
- Bentonitlagret: bentonit, tjocklek cirka en meter.
- Yttre betongsilon: armerad betong, tjocklek cirka en meter.
- Fyllnad runt yttre betongsilon: bergkross, tjocklek cirka två meter.
- Under yttre betongsilon: dränerat lager av bergkross, tjocklek cirka två meter.
- Återfyllning av överdelen: bergkross, tjocklek 5–10 meter.

Under vattenmättnadsfasen, efter förslutning, kommer det ensidiga hydrostatiska vattentrycket i berget på 300–500 meters djup att vara 3–5 MPa. Den inre silon förväntas då ha stöd genom det deponerade avfallet och dess kringgjutning. Hur den yttre betongsilon påverkas av det ensidiga hydrostatiska vattentrycket liksom av det svälltryck som den mellan betongcylindrarna placerade bentoniten utövar behöver utredas.

Tekniska lösningar för att hantera gastransporten genom barriärerna kan behöva utvecklas.

Program

Efter att konceptstudien presenteras i slutet av 2013 kommer teknikutvecklingen att fokusera på den eller de lösningar som ska analyseras i säkerhetsvärderingen.

Säkerhetsvärderingen av koncept som presenteras 2016 kommer att ge krav på de tekniska barriärernas egenskaper. Utifrån dessa krav kan en mer detaljerad beskrivning av utformningen utarbetas.

8.2.2 Förslutning

De tekniska frågeställningarna kring pluggar och återfyllning förutses likartade för SFL som för SFR. Det program för den fortsatta teknikutvecklingen av pluggar och återfyllning av förvarsutrymmen som bedrivs inom ramen för utbyggnadsprojektet SFR, och som beskrivs i avsnitt 8.1.7 Förslutning, fyller därför de behov som i dag identifierats för SFL.

8.2.3 Behållare

Vid utformningen av ett hanteringssystem för avfall behöver alla delar i hanteringskedjan från avfallsproducenterna till slutförvaret beaktas för att hitta en så gynnsam lösning som möjligt, totalt sett. En viktig komponent för att utveckla hanteringskedjan för det avfall som ska deponeras i SFL är att identifiera lämpliga behållare för slutförvaret. Utvecklingen av behållare stöder även arbetet med att utveckla acceptanskriterier för avfallet, layout av förvarsdelarna och hanteringsutrustningen.

En studie har genomförts för att på konceptnivå utveckla en serie av behållare för SFL-avfall. SFL-avfallet föreligger i många olika former och förpackningar, både som konditionerat avfall och som mellanlagrat återtagningsbart avfall. Studiens syfte har varit att utgående från det befintliga avfallet och dess förpackningar, utveckla behållare med dimensioner som bygger på ett modulsystem för transport och deponering i SFL. Målet är att ta fram en serie behållare som genom ett gemensamt hanteringssystem, som lyftverktyg och transportbehållare, möjliggöra en rationell hantering i alla led. Studien redovisas i en rapport som färdigställs 2013 och redovisas översiktligt i följande avsnitt.

Konceptuell utformning av följande fem behållare redovisas:

- Behållare för fyra standardkokiller.
- Behållare för 16 stycken 200-litersfat på fatbricka.
- Behållare för 16 fat placerade i 280-liters skyddsfat.
- Skärmad behållare för hårdkomponenter.
- Långtidsbeständig skärmad behållare för hårdkomponenter.

Mått, volymer och vikter för samtliga behållare redovisas i tabell 8-1.

Förutsättningar

Allmänna förutsättningarna för studien, utöver avfallet, är följande:

- Det har förutsatts att avfallsbehållarna för SFL, om möjligt, ska ha samma ytterdimensioner (längd×bredd) för att underlätta hantering och transporter med ATB (Avfallstransportbehållare). Maximal transportvikt (ATB inklusive last) är begränsad till 120 ton.
- Samtliga behållare ska kunna staplas.
- Avfallet i samtliga behållare ska kringgjutats med betong.
- Efter deponering i SFL ska samtliga behållare kunna kringgjutats med betong om förvarets långsiktiga säkerhet så kräver.
- Lyftanordningar och lyftverktyg dimensioneras med överstyrka, alternativt redundans.
- Skärmd behållare för hårdkomponenter samt långtidsbeständig skärmd behållare ska utföras i plåt med tjocklek 100 millimeter.
- Skärmd behållare för hårdkomponenter ska vara försedd med skruvat lock.
- Långtidsbeständig behållare ska vara utförd med fullt genomsvetsade svetsfogar. Detta gäller även svetsfog för lock.

Konceptuell design

En grundförutsättning för studien är att samtliga behållare ska ha samma ytterdimensioner avseende längd och bredd samt att man ska kunna hantera avfallsbehållarna med ett och samma lyftverktyg.

Eftersom ett och samma lyftverktyg bör kunna användas för samtliga behållare, har en ny typ av lyftfäste som är placerat i behållarnas hörn tagits fram. Lyftfästet utgörs av en bockad plåt, se figur 8-9, som även fungerar som styrning vid stapling av avfallsbehållarna samt för styrning av lyftverktyget. Lyftfästena, som utformas lika för samtliga behållare, dimensioneras efter den behållare som är tyngst. Dimensioneringsmässigt antas att endast två (diagonalt) av fyra lyftfästen bär lasten, det vill säga dimensionering görs med överstyrka.

Figur 8-10 visar principen för föreslaget lyftverktyg. Lyftverktyget utgörs av en ram försedd med fyra horisontella sprintar placerade i ramens hörn. Sprintarna är hydrauliskt manövrerade.



Figur 8-9. Lyftfäste för behållare för SFL.



Figur 8-10. Lyftverktyg.

Behållare för kokiller

Behållare för kokiller ska kunna lastas med fyra standardkokiller, se figur 8-11. För att underlätta kringgjutning har följande antaganden gjorts:

- Avstånd mellan kokiller: 50 millimeter.
- Avstånd kokill/insida behållare: 20 millimeter.
- Avstånd överkant kokill/överkant behållare: 80 millimeter.

Behållaren utgörs av ett svetsat ramverk i fyrkantrör. Ramverkets sidor utgörs av korrugerade plåtar som är svetsade till ramverket. Plåtarna är korrugerade för att dessa inte ska deformeras vid kringgjutning. Bottenplåten utgörs av en slät plåt med förstövningar placerade som ett kors inuti behållaren, se figur 8-12. Förstövningarna fungerar även som guider/styrningar för kokillerna när dessa placeras i behållaren. Bottenplåten ligger jäms med ramverkets underkant för att luftfickor inte ska bildas på undersidan av behållaren vid stapling och efterföljande kringgjutning med betong. Guider/styrningar för kokillerna finns även längs behållarens yttersidor.



Figur 8-11. Behållare för fyra kokiller; lastad. Armering för kringgjutning synlig.



Figur 8-12. Behållare för fyra kokiller, tom. Förstyvningsplåtarna för bottenplåten och guider/styrningarna för kokillerna synliga.

Behållaren kommer inte att förses med lock. Betongytan efter kringgjutning av lasten ska därför vara i nivå med ramverkets överkant. Betongytan över kokillerna kan förses med armering för att minska risken för sprickbildning vid hantering av avfallsbehållarna.

Behållare för fat

Behållare för fat ska kunna lastas med fyra fatbrickor med vardera fyra 200-litersfat, se figur 8-13 och figur 8-14. Behållarens utförande är i princip samma som behållaren för kokiller. Skillnaden är höjden som är anpassad till höjden på de största faten samt att guiderna/styrningarna är anpassade efter fatbrickornas något större dimensioner. Nominellt avstånd mellan fatbrickor för kringgjutning är 40 millimeter.

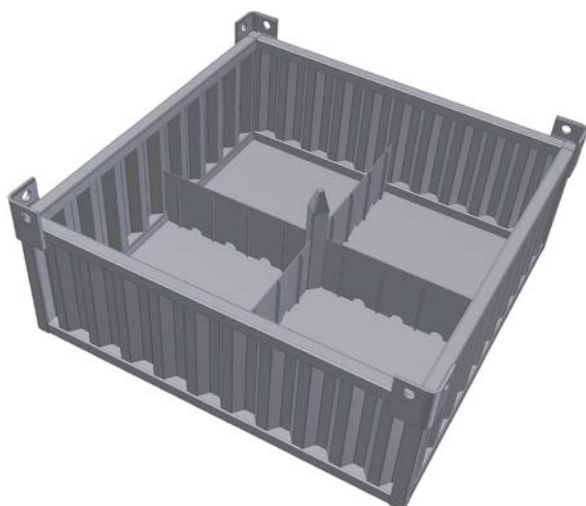
Behållare för fat i skyddsfat

Ett stort antal av 200-litersfat från SVAFO har placerats i 280-liters skyddsfat. Behållaren ska kunna lastas med 16 fat placerade i skyddsfat, se figur 8-15.

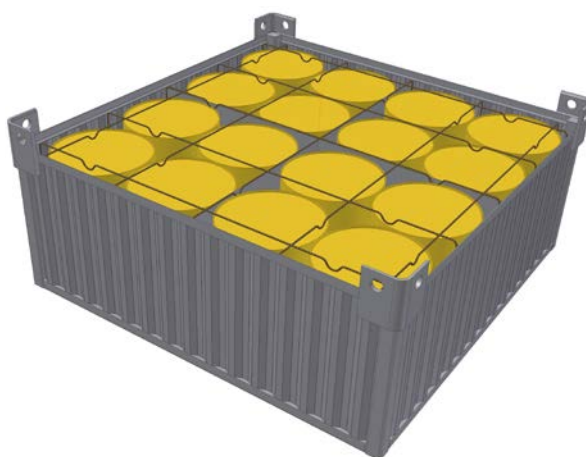
Behållarens utförande är i princip samma som behållaren för fat. Skillnaden är höjden samt behållarens inermått som anpassas till skyddsfatens dimensioner.



Figur 8-13. Behållare för fyra fatbrickor (16 fat), lastad. Armering för kringgjutning synlig.



Figur 8-14. Behållare för fyra fatbrickor (16 fat), tom. Förstyvningsplåtarna för bottenplåten och guider/styrningarna för fatkorgar synliga.



Figur 8-15. Behållare för fat placerade i skyddsfat, lastad. Armering för kringgjutning synlig.

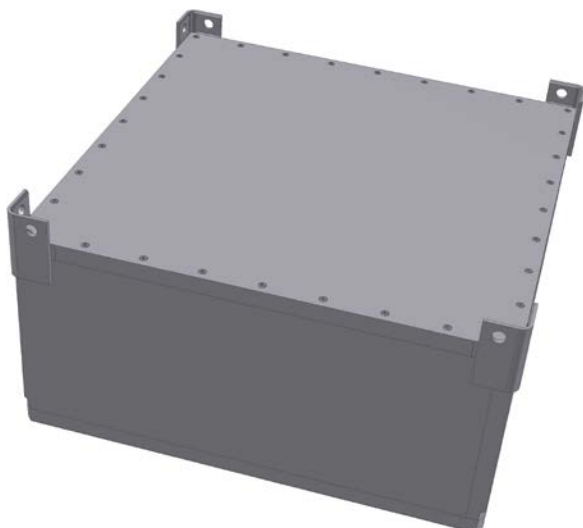
Skärmad behållare för härdkomponenter

Behållaren för härdkomponenter har strålskyddsmässigt samma funktion som den befintliga ståltanken (även kallad BFA-tank), men är måttmässigt anpassad till övriga behållare som redovisas i detta avsnitt. Den saknar kassett för avfallet.

Den skärmade behållaren för härdkomponenter, se figur 8-16, har samma yttermått som behållaren för kokiller. Behållarens samtliga sidor är utförda i 100 millimeter tjock plåt och är försedd med lock som skruvas fast med skruvar. Behållarens innermått i plan (längd×bredd) är densamma som för behållaren för kokiller. Invändig höjd är mindre på grund av den tjockare botten samt locket.

Behållarens sidoplåtar samt botten sammanfogas med svets. Utifrån erfarenhet från liknande konstruktioner (exempelvis de ståltankar som i dag används för mellanlagring av härdkomponenter) är bedömningen att svetsarna utförs med konventionell svetsteknik, med ett djup på svetsfogen i storleksordningen 10–15 millimeter. På grund av materialets tjocklek krävs förhöjd arbetstemperatur (100–200 °C) samt normalt efterföljande avspänningsglödning (550–650 °C).

Efter svetsning planfräses uppläggningsytan för locket. Ingen tätning förutses mellan lock och behållare; tätytan utgörs av stål mot stål. Avfall som placeras i behållaren kringgjuts med betong upp till nivå för locket underkant. Efter kringgjutning monteras locket med skruvar till behållaren. Behållaren är försedd med styrdubbar för locket och lyftfästena fungerar som grov styrning. Locket hanteras med lyftöglor som efter montage demonteras.



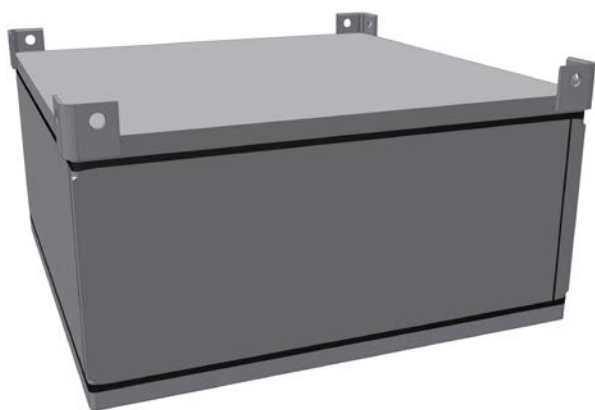
Figur 8-16. Skärmad behållare för hårdkomponenter med monterat lock.

Långtidsbeständig skärmad behållare för hårdkomponenter

En långtidsbeständig skärmad behållare för hårdkomponenter har strålskyddsmässigt samma funktion som den befintliga ståltanken (även kallad BFA-tanken) och den ovan redovisade skärmade behållaren för hårdkomponenter, men tillverkas på ett sådant sätt att den kan tillskrivas en långsiktig inneslutande funktion i slutförvaret. Kritiskt är fogningen av behållarens plåtar som måste uppfylla samma krav på korrosionsbeständighet som plåtarna i övrigt. Behållaren redovisas som ett möjligt hanteringsalternativ för hårdkomponenter, för det fall att en inneslutande funktion hos behållaren eftersträvas.

Den långtidsbeständiga skärmade behållaren, se figur 8-17, ska ha samma yttermått som behållaren för kokiller. Behållarens samtliga sidor är utförda i 100 millimeter plåt samt försedd med lock som svetsas till behållaren. Samtliga svetsar ska utföras genomsvetsade och målet är att svetsen ska ha samma egenskaper avseende korrosion som grundmaterialet.

För åtkomlighet vid svetsning av locket är behållarens lyftfästen monterade på locket. För att kunna hantera behållaren innan locket monteras finns lyftfästen på insidan av behållaren, se figur 8-18. Lyftfästena ska vara dimensionerade för att kunna hantera lastad behållare. Vid hantering används ett lyftverktyg med "vridklubbor". Detta lyftverktyg är utformat som en påhångsmodul till det ordinarie lyftverktyget (som visas i figur 8-10).



Figur 8-17. Långtidsbeständig skärmad behållare för hårdkomponenter med monterat lock.



Figur 8-18. Lyftfästen inuti långtidsbeständig skärmad behållare för hårdkomponenter.

Information har inhämtats avseende olika svetsutrustningars geometriska begränsningar vid sammanfogning av behållarens sidor och botten samt vid montage av locket. Det bör vara möjligt att för sammanfogning av behållarens sidor använda pulverbågs svetsning, något som då måste utföras i horisontellt läge. Genom att använda så kallad narrow gap-svetsning minskas erforderlig svetsvolym och därmed eventuell svetsdeformation och svetsgenspänningar. Svetsning av lock och botten kan utföras med traditionell svetsprofil, till exempel J-fog enligt SS-EN ISO 9692-1:2004 (SIS 2004), där svetsningen kan utföras med robotiserad MIG (gasmallbågs svetsning med skyddsgas).

Samtliga svetsarbeten måste på grund av godstjockleken utföras vid förhöjd arbetstemperatur (100–200 °C) för att minska risken för väteförsprödning samt normalt även följas av avspänningsglödning (550–650 °C). Avspänningsglödning torde inte vara möjlig efter svetsning av locket då behållaren är fylld och avfallet är kringgjutet med betong. En möjlighet är att behålla den förhöjda arbetstemperaturen en viss tid efter avslutad svetsning för att erhålla en gynnsammare avsvälning och för att minska risken för eventuella fasomvandlingar i materialet. Bedömningen är att utebliven avspänningsglödning inte påverkar materialets egenskaper avseende korrosionsbeständighet. Efter slutförd svetsning kan oförstörande kontroll utföras för att verifiera svetsens kvalitet. Det bör poängteras att kringgjutningen måste vara fullständigt härdad innan locket kan monteras och svetsas fast.

Stapling

Stapling av avfallsbehållarna underlättas av att lyftfästena, placerade i hörnen på avfallsbehållarna, även fungerar som styrningar. Beträffande antalet behållare som kan staplas på varandra har överslagsberäkningar utförts med givna förutsättningar att samtliga behållare ska fyllas med betong samt att avfallsbehållarna vid deponering kringgjutts med betong.

För avfallsbehållarna för kokiller och fat, som är dimensionerade vid stapling, antas att lasten endast upptas av den del av ytan som utgörs av kringgjutningsbetongen inuti avfallsbehållarna. Ingen hänsyn tas till själva behållarens bärande förmåga. Konservativa överslagsberäkningar visar att minst 20 behållare kan staplas på varandra utan kringgjutning utanför avfallsbehållarna, samt att minst 40 behållare kan staplas på varandra om kringgjutning utförs runt avfallsbehållarna. Mer detaljerade beräkningar som även tar hänsyn till avfallsbehållarnas bärande förmåga bör resultera i att ännu fler behållare kan staplas. Stapling vid eventuell mellanlagring begränsas således inte av hållfasthetsmässiga aspekter utan av stabilitets- och hanteringsmässiga aspekter.

Dimensioner och data

I tabell 8-1 presenteras mått, volymer och vikter för de fem olika behållarna som redovisats.

Tabell 8-1 Sammanställning av dimensioner och data för behållare.

	Enhet	Behållare för kokiller	Behållare för fat	Behållare för fat i skyddsfat	Skärmad behållare för härdkomponenter	Långtidsbeständig skärmad behållare för härdkomponenter
Ytermått (LxB)	mm	2 690×2 690	2 690×2 690	2 690×2 690	2 690×2 690	2 690×2 690
Ytermått (H)	mm	1 296	980	1 050	1 296	1 296
Innermått (LxB)	mm	2 490×2 490	2 490×2 490	2 630×2 630	2 490×2 490	2 490×2 490
Innermått (H)	mm	1 284	968	1 038	1 096	1 096
Volym (ytter)	m ³	9,38	7,09	7,6	9,38	9,38
Volym (inner)	m ³	8,6	6,48	7,34	6,8	6,8
Volym (last)	m ³	6,91	3,33	3,33	2,55	2,55
Volym (betong)	m ³	1,69	3,16	4,02	4,25	4,25
Vikt (tom)	kg	1 755	1 602	1 480	20 300	20 300
Vikt (last)	kg	20 000	8 000	8 400	20 000	20 000
Vikt (betong)	kg	3 377	6 312	8 031	8 495	8 495
Vikt (totalt)	kg	25 200	16 000	18 000	48 800	48 800

Program

Den fortsatta utvecklingen av långtidsbeständiga behållare innefattar tillverkningsförsök. Fognings- teknikens tillämplighet och praktiska genomförbarhet kommer att utredas. Fogens egenskaper kommer att karakteriseras och olika kvalitetsmått på dessa egenskaper värderas. Programmet syftar till att utveckla kunskapen kring fogning av tjockväggigt gods för slutförvarstillämpningar generellt. Kunskapen är således tillämplig inte enbart på den långtidsbeständiga behållaren som presenterats ovan, utan även den befintliga ståltanken för mellanlagring av härdkomponenter. Detta arbete påbörjas under innevarande treårsperiod.

Utvärderingen av den långsiktiga säkerheten som presenteras 2016 kommer att ge krav på avfallet och behållare, exempelvis krav på mekaniska egenskaper. Utifrån dessa krav kan behållare utvecklas mer i detalj och slutligen fastställas som preliminärt slutförvarskolli för SFL. Utvecklingen av lyftverktyg styrs av valet av behållare.

För att transportera långlivat avfall som placerats i behållare beskrivna i avsnittet, behöver nya transport-behållare utvecklas och licensieras. Behov och krav på dessa transportbehållare behöver utredas, vilket påbörjas efter att preliminära slutförvarskollin för SFL fastställts.

8.2.4 Hanteringsutrustning för härdkomponenter

FKA och SKB har gemensamt utvecklat hanteringsutrustning för att segmentera och lyfta ur härdkomponenter och interndelar ur reaktorbassänger till ståltankar. Ståltankens kassett sänks ned i bassängen där den fylls med segmenterade härdkomponenter och interndelar. Kassetten lyfts sedan under en strålskyddande huv till en i reaktorhallen placerad ståltank. Genom ett vakuumpumpsystem torkas tanken och avfallet innan locket monteras och tanken transporteras ut i en transportbehållare.

Hanteringsutrustningen för härdkomponenter är driftsatt och har använts av FKA för att lyfta ur segmenterade härdkomponenter och interndelar till ståltankar. Härdkomponenterna härrör från effekthöjningar i alla tre blocken under 2000-talet, och utrustningen planeras att användas av BKAB för att lyfta ur segmenterade härdkomponenter vid nedmontering och rivning av reaktorerna i Barsebäck.

8.2.5 Segmentering av styrvastavar

SKB har genomfört en förstudie för att se över möjligheterna att segmentera BWR-styrvastavar i Clab. En segmentering av styrvastavar kan göras med syftet att erhålla en mer kompakt våt mellanlagring i Clabs bassänger, eller en mer kompakt torr mellanlagring på annan plats. Styrvastavarna i Clab har tillförts under lång tid och finns i flera olika modeller. Ur utredningens synvinkel kan dessa delas in i styrvastavar från ABB Atom/Westinghouse och styrvastavar från General Electric baserat på deras principiella design.

Styrvastavsskaften kapas generellt vid kärnkraftverken för att möjliggöra transport till Clab. Den återstående delen utgörs i huvudsak av ett 4,2 meter långt och 0,3 meter brett kors samt en omkring 0,3 meter lång skaftstump.

Studerad kapningssekvens:

- Steg 1: Med en bandsåg kapas den nedre skaftdelen/skaftstumpen med ett horisontellt snitt i styrvastavbladens nedre del. Den kapade skaftstumpen greppas med ett lyftverktyg och transporteras till lämplig skrotkassett.
- Steg 2: Med en bandsåg kapas styrvastavskorset i fyra separata blad. Detta är tänkt att göras med ett vertikalt snitt i korsets centrum. De separata bladen greppas och hanteras med ett lyftverktyg och placeras antingen i en omlastningsposition eller direkt i en kassett för fortsatt förvaring i Clabs förvaringsdel.

Kassetten utformas för normal hantering i Clab och är tänkt att ha de invändiga måtten 760×760 millimeter samt en höjd som klarar av fullängdsbladen på 4,2 meter. En teoretisk packningsgrad om 500 blad, det vill säga 125 styrvastavar, kan då erhållas. En mer rimlig uppskattning, baserad på tidigare erfarenhet och gällande viktbegränsningar för hanteringsutrustningar, skulle vara omkring 90 styrvastavar per kassett.

För att möjliggöra mellanlagring i exempelvis en ståltank behöver bladens längd reduceras. Det kan göras genom att addera ett tredje segmenteringssteg till den ovan beskrivna kapningssekvensen:

- Steg 3: Kapning av bladen till lämplig längd.

Då segmenteringen kan komma att genomföras i en bassäng där det även finns annan utrustning, bör det installeras någon form av avskärmning kring kapningsområdet. Detta för att förhindra att skräp och spån sprids över stora områden och till annan utrustning i bassängen. Sådan avskärmning används standardmässigt vid kärnkraftverken då hårdkomponenter och interndelar segmenteras. Även vattenreningen i avskärmningen bedöms kunna ske med etablerade metoder.

Styrvastavblad från ABB Atom/Westinghouse består huvudsakligen av 8–10 millimeter tjocka plåtar i vilka det horisontellt har borrats hål för att möjliggöra inneslutning av borkarbidpulver (i vissa positioner borkarbidstavar) eller hafnium. När de kapas punkteras ett till två borrade hål, vilket innebär att en begränsad mängd av borkarbid kan släppas ut i vattnet. Gjorda prov visar att inget övertryck finns i styrvastavarna. Designen på styrvastavbladen från General Electric är annorlunda i det att de består av vertikala rör fyllda med borkarbidpulver, vilka är insvepta i ett rostfritt plåthölje. Då bladet ska kapas till lämplig längd påverkas därmed samtliga kanaler i bladet. Lämplig metod för att kapa styrvastavbladen återstår att utreda.

Det finns risk för att tritium släpps ut när styrvastavbladen kapas. Tritium bildas från borkarbidet i styrvastavbladen under drift. De studier som har gjorts visar på låga utsläpp, som kan hanteras med exempelvis en huv för att samla upp gasen.

9 Ansvar, planering och teknik för avveckling av kärntekniska anläggningar

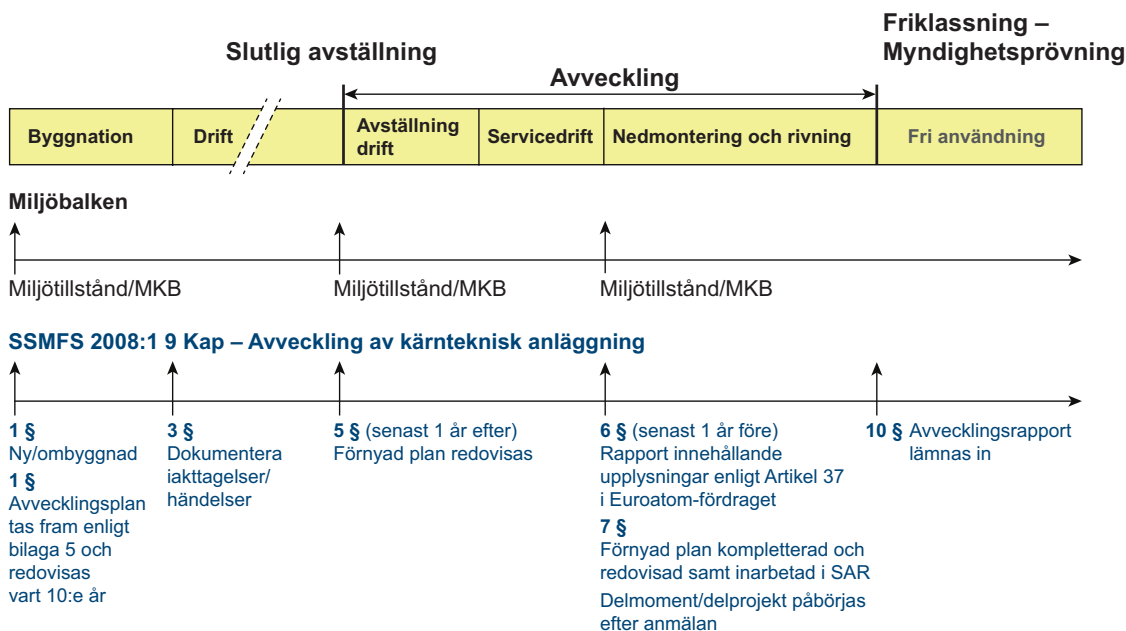
I detta kapitel redovisas hur ansvaret för avveckling av kärnkraftsreaktorerna har fördelats mellan respektive tillståndshavare och SKB. Planeringen för hur avvecklingen av reaktorerna och SKB:s egna kärntekniska anläggningar ska genomföras presenteras också. Vidare redovisas hur samarbete bedrivs nationellt och internationellt för att öka kompetensen inom avvecklingsarbetet.

Figur 9-1 visar en översikt av SSM:s krav gällande avveckling under ett kärnkraftverks livslängd. Avveckling omfattar avställningsdrift, servicedrift samt nedmontering och rivning. Avställningsdrift är verksamheten från det att kärnkraftsreaktorn slutgiltigt ställts av till dess att allt bränsle avlägsnats från anläggningen. I de fall nedmontering och rivning inte kan inledas omedelbart efter avställningsdriften vidtar en period av så kallad servicedrift. Under nedmontering och rivning pågår de aktiviteter som behövs för friklassning av anläggningen. Efter att SSM godkänt en ansökan om friklassning av anläggningen kan denna befrias från kvarstående skyldigheter enligt kärntekniklagen och strålskyddslagen.

Enligt miljöbalken ska en miljökonsekvensbeskrivning lämnas in både innan slutlig avställning av anläggningen och som en del i ansökan om att få utföra nedmontering och rivning, se figur 9-1.

För att uppfylla kapitel 9 i (SSMFS 2008:1) ställs krav på följande:

- Avvecklingsplan och avvecklingsstrategi.
- Åtgärder i samband med slutlig avställning och servicedrift.
- Åtgärder i samband med nedmontering och rivning.
- Dokumentation och avvecklingsrapport.



Figur 9-1. Översikt av SSM:s krav gällande avveckling under ett kärnkraftverks livslängd.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I SSM:s granskning av Fud-program 2010 påpekades att avveckling behöver redovisas mer utförligt och på en mer detaljerad nivå. SKB:s planer i förhållande till kärnkraftsföretagens aktiviteter behöver förtydligas och SKB:s flexibilitet i förhållande till ändrade planeringar för kärnkraftverken redovisas. Vidare behöver redovisningen i Fud-programmet visa att det är tillståndshavarna för respektive anläggning som står bakom denna redovisning samt förtydliga om det är redovisningen i Fud-programmet eller respektive avvecklingsplan som gäller när dessa skiljer sig åt.

I regeringsbeslutet av Fud-program 2010 angavs att reaktorinnehavarna ska redovisa planer och strategier avseende avveckling av kärnkraftverken (inklusive Ågesta) mer utförligt och inkludera vilka uppgifter som delegerats från reaktorinnehavarna till SKB. Reaktorinnehavarna ska fortlöpande samråda med SSM i frågor rörande avvecklingsplaner och studier för avveckling.

Vidare angav Kärnavfallsrådet i sina kommentarer att de bland annat önskade en tydligare redovisning av rivningsgruppens roll samt ett förtydligande kring möjligheten att konditionera avfall från nedmontering och rivning i syfte att reducera avfallsvolymen och möjliggöra återvinning av material.

Nuläge

Studierna för avveckling har färdigställts för kärnkraftverken i Forsmark (SKB 2013c), Oskarshamn (SKB 2013d) och Ringhals (SKB 2013e) under 2013 medan studien för kärnkraftverket i Barsebäck (Griffiths et al. 2008) varit klar sedan tidigare. I studierna redovisas uppskattningar för mängden avfall, tidsplaner och kostnader vid avveckling av respektive anläggning. Detta utgör underlag för att dimensionera SKB:s slutförvarssystem samt avgifter för avsättning till Kärnavfallsfonden. I och med detta arbete har aktivitetsberäkningar genomförts för samtliga reaktorblock för att skapa ett avfallsinventarium vid nedmontering och rivning. En jämförande analys har genomförts av dessa studier som redovisar och förklarar kvalitativa och kvantitativa skillnader (Paul 2013).

Under 2012 har Vattenfall tillsammans med SVAFO färdigställt en ny studie för avveckling av Ågesta. För vidare information se avsnitt 9.3.6.

Friklassningshandboken (SKB 2011d) har färdigställts under 2011 och utbildning om friklassning i enlighet med handboken sker inom industrin. Handboken är huvudsakligen framtagen ur ett driftperspektiv och behöver belysas ytterligare ur ett avvecklingsperspektiv, vilket redovisas under avsnitt 9.3.8.

Inom OECD/NEA i samarbete med IAEA och EU har en uppdaterad kostnadsstruktur tagits fram för att redovisa kostnadsuppskattningar för avveckling av kärntekniska anläggningar (OECD/NEA et al. 2012). Den nya strukturen används för att redovisa kostnadsuppskattningar för kärnkraftverken i Forsmark, Oskarshamn, Ringhals, Barsebäck och Ågesta samt i SKB:s Planarbete.

9.1 Samråd med SSM

Sedan Fud-program 2010 har tillståndshavarna för kärnkraftverken (inklusive Ågesta) tillsammans med SKB hållit samråd med SSM inom området avveckling. Frågor i linje med slutsatserna från Fud-program 2010 har diskuterats och SSM har på en övergripande nivå fått ta del av den redovisning om avveckling som SKB planerat till Fud-program 2013.

9.2 Ansvarsfördelning

Tillståndshavaren för en anläggning ansvarar för att SSM:s krav enligt figur 9-1 uppfylls.

Tillståndshavarna för de kärntekniska anläggningarna i Sverige har, enligt kärntekniklagen ansvar för att på ett säkert sätt avveckla de radioaktiva delarna av anläggningarna (SFS 1984:3). Avvecklingen ska redovisas i planer där detaljeringsgraden på redovisningen ökar när anläggningen närmar sig avvecklingsperioden. Vidare anges i finansieringslagen att en tillståndshavare ska beräkna den uppskattade kostnaden för avveckling av kärnkraftverk (SFS 2006:647).

För avvecklingen av de svenska kärnkraftsreaktorerna i Barsebäck, Forsmark, Oskarshamn och Ringhals har tillståndshavarna Barsebäck Kraft AB, Forsmarks Kraftgrupp AB, OKG Aktiebolag respektive Ringhals AB ansvaret. För Ågesta kraftreaktor ansvarar Vattenfall AB och SKB ansvarar för sina anläggningar Clink, SFR, Kärnbränsleförvaret och SFL.

Tillståndshavaren ansvarar för avfallet tills det är friklassat eller tills SSM har fattat beslut om förslutning av aktuellt slutförvar, och regeringen beslutat om befrielse från ansvar enligt 10 § kärntekniklagen (SFS 1984:3).

9.2.1 Ansvarsfördelning mellan SKB och tillståndshavare till svenska kärnkraftsreaktorer

SKB har i uppdrag att bistå tillståndshavarna i deras arbete med att fullgöra de skyldigheter som åligger RAB, OKG, FKA och BKAB enligt 11 § kärntekniklagen. Detta innebär att svara för nödvändig forsknings- och utvecklingsverksamhet för att fullgöra skyldigheten att utföra de åtgärder som behövs för att på ett säkert sätt avveckla anläggningar där kärnteknisk verksamhet inte längre ska bedrivas.

I detta uppdrag ska SKB delta i planering och genomförande av kommande avveckling av kärnkraftverken och ska i huvudsak samordna användandet av generella metoder och rutiner för avvecklingsarbete inklusive beräkning av avfallsvolymer, radionuklidinventarium och kostnader.

Det är tillståndshavarna som enligt dagens lagkrav ansvarar fullt ut för sin avveckling medan SKB svarar för uppdrag enligt ovan som samordnas ur ett nationellt perspektiv.

9.2.2 Ansvarsfördelning mellan SKB och tillståndshavare/ägare till Ågesta kraftvärmereaktor

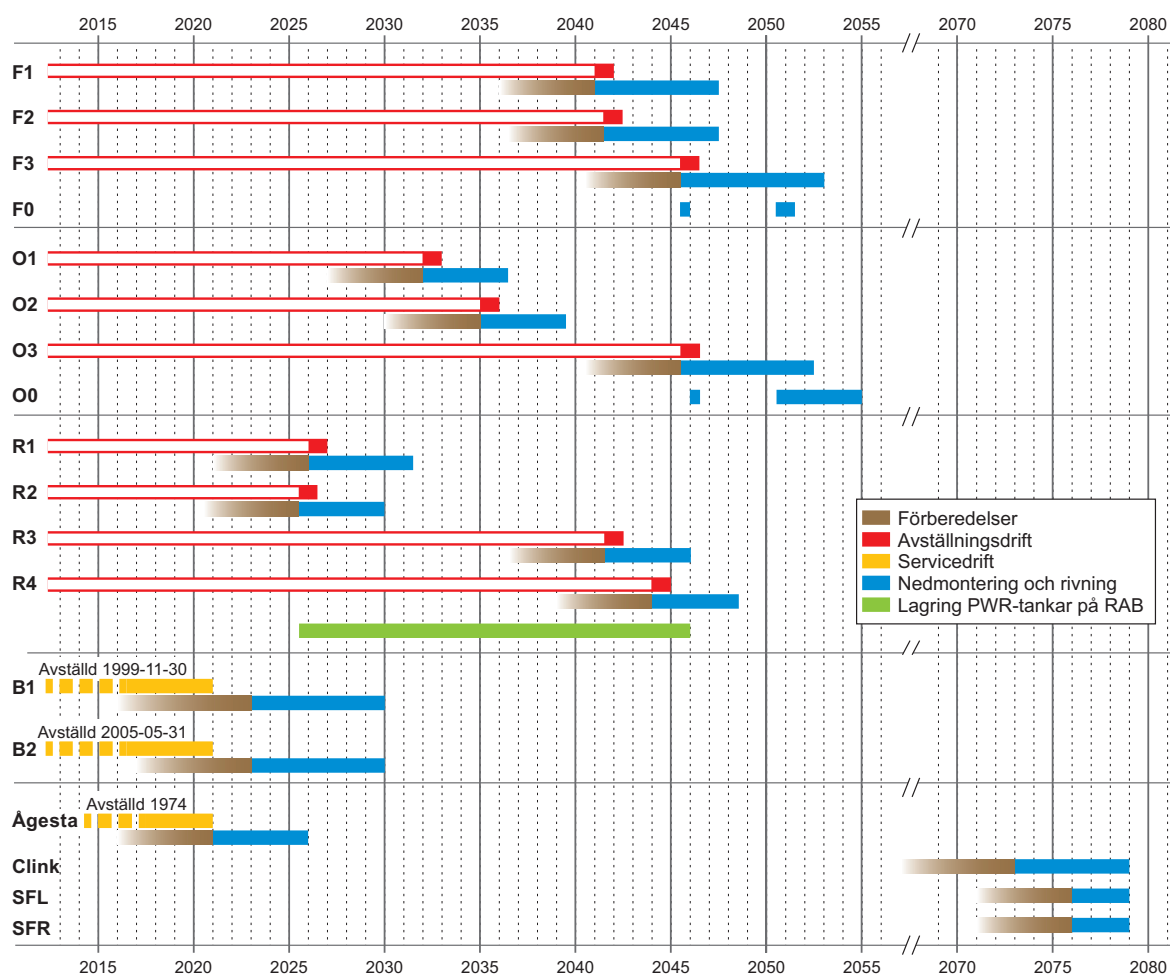
SKB har inte erhållit något avtalat uppdrag från tillståndshavaren för Ågesta gällande avvecklingsfrågor.

9.3 Planering inför avveckling och utveckling av metoder

SKB:s målsättning är att kunna ta hand om det radioaktiva avfallet från nedmontering och rivning av de kärntekniska anläggningarna i överensstämmelse med deras avvecklingsplaner. Planerna för kärnkraftverken och för SKB:s anläggningar uppdateras successivt i dialog mellan berörda parter. Arbetet med planerna är en iterativ process där kompetensen och förståelsen ökar vartefter och studierna för avveckling uppdateras och utvecklas.

9.3.1 Avvecklingsstrategier

Internationellt nämns ofta tre olika strategier för avveckling vilka går under benämningarna Direct dismantling, Safestore och Entomb. I Sverige planeras avvecklingen av kärnkraftverken i huvudsak att genomföras i enlighet med den strategi som benämns Direct dismantling. Detta innebär att alla komponenter och byggnader som är radioaktiva dekontamineras och/eller nedmonteras kort tid efter avställning och att avfallet transporteras och deponeras i ett slutförvar, alternativt paketeras och transporteras till ett redan etablerat mellanlager. För kärnkraftverken i Barsebäck och Ågesta blir detta inte helt applicerbart i och med att dessa redan är avstängda och befinner sig i servicedrift. Under respektive avsnitt nedan beskrivs varje tillståndshavares avvecklingsplanering och strategi i mer detalj. Figur 9-2 återger en övergripande referenstidsplan utifrån tillståndshavarnas planering.



Figur 9-2. Referenstidsplan för avveckling av kärntekniska anläggningar (F0 och O0 är gemensamma anläggningar på förlägningsplatserna som redovisas separat).

9.3.2 Barsebäck Kraft AB:s planering för avveckling och utveckling av metoder

E.ON Kärnkraft Sverige är anläggningsägare till Barsebäckverket och Barsebäck Kraft AB är innehavare av det kärntekniska tillståndet.

Enligt BKAB:s nuvarande planering ska ett slutförvar för det kortlivade låg- och medelaktiva avfallet från nedmontering och rivning stå klart att ta emot avfallet, förberedelserna vara klara och samtliga tillstånd ha erhållits innan nedmonteringen och rivningen påbörjas (Lorentz och Pålsson 2012). Under 2013 utreder BKAB möjligheterna för nedmontering och rivning utan tillgång till ett utbyggt SFR. En av förutsättningarna för att detta ska kunna optimeras och genomföras tidigare är att det finns ett mellanlager för avfallet att tillgå kring 2018–2019. Vidare planeras att nedmontering och rivning av Barsebäck 1 (B1) och Barsebäck 2 (B2) genomförs som ett gemensamt projekt samt att kravbilderna är klarställda innan projektet startas. Slutmålet med avvecklingen är att Barsebäckverket är friklassat enligt gällande myndighetskrav.

BKAB:s inriktning för avvecklingen är att den ska vara säker, snabb och kostnadseffektiv. Detta innebär att potentiella risker elimineras eller reduceras. Detta sker dels genom att minska dosbelastningen, vilket i huvudsak sker genom att utföra systemdekontaminering, dels genom att nedmontera stora enheter. Vidare skapas förutsättningar för en smidig logistik främst genom detaljerad karakterisering, klarställd kravbild, god planering, godkända typbeskrivningar för respektive avfallstyp samt att SFR är klart för att ta emot låg- och medelaktivt avfall från nedmontering och rivning. Kostnadseffektivitet uppnås genom att ha en tydlig projektledning och en effektiv tidsplan för nedmontering och rivning fram till friklassad anläggning.

Tidshorisonen för ett färdigt slutförvar med plats för avfall från nedmontering och rivning innebär att BKAB kan genomföra omfattande kvalitativa förstudier. Vidare kan man analysera och dra nytta av internationell erfarenhetsåterföring med inriktning på en säkrare, snabbare och mer kostnadseffektiv avveckling.

BKAB avser att inte behandla det uppkomna radioaktiva avfallet i någon större omfattning på Barsebäcksverket. Detta för att optimera hanteringen och därmed hålla nere dosbelastningen. Däremot kan det bli aktuellt att skicka lågaktivt avfall från nedmontering och rivning externt för smältning och förbränning. I övrigt packas det kortlivade låg- och medelaktiva avfallet i avsedda slutförvarskollin och skickas direkt till slutförvar. Härdkomponenter (långlivat avfall) mellanlagras tills SFL är driftsatt.

De totala avfallsmängderna, aktivt och icke aktivt avfall, har uppskattats genom en inventering med syfte att kvantifiera volymer och massor. Nedmontering, rivning, avfallshantering och transport ska genomföras som en industriell process med tydliga produktionslinjer. Låga stråldoser till personalen prioriteras, vilket innebär att radioaktiva delar monteras ner och transporteras bort i större enheter. Vidare innebär det att friklassningsåtgärder såsom dekontaminering endast utförs när ett rimligt värde för återvinning kan identifieras. Detta kan leda till något större volymer av radioaktivt avfall men uppvägs av mindre stråldoser till personal, kortare tidsplan och totalt lägre utnyttjande av resurser. I planeringen ingår att nedmontera reaktortankarna i ett stycke utan interndelar, eftersom tankarna ska slutförvaras hela. Markförvar för lågaktivt avfall kommer inte att etableras på Barsebäcksverket.

Mängden radioaktivt avfall som ska deponeras i SFR uppskattas till cirka 18 000 ton. Det totala transportbehovet av avfallskollin bedöms till två hela reaktortankar, cirka 800 ISO-containerar, cirka 300 stålkokiller och cirka 80 ståltankar. Transporterna till SFR beräknas bli jämnt fördelade över de år då nedmontering och rivning sker. Mängden radioaktivt avfall som kan friklassas uppskattas till cirka 2 500 ton och är i huvudsak objekt från turbinanläggningen som kan skickas för smältning. Allt övrigt material på kontrollerat område bedöms som friklassningsbart och rivningsvolymerna för detta är i nuläget inte uppskattade.

Segmentering av interndelar är en av de mest tidskrävande aktiviteterna vid ett avvecklingsprojekt. BKAB har etablerat ett projekt som omfattar segmentering och paketering av interndelar i bassängerna samt interndelar i reaktortankarna på B1 och B2. Förvaringen kommer att ske i ett nybyggt lager för interndelar på bevakat område, liknade det som har uppförts i Forsmark. Byggandet av detta lager planeras starta under våren 2014 och beräknas ta cirka sju månader. Segmentering och transport av avfall till lagret startar under våren 2015 och avslutas i början av 2017. Transport av ståltankarna till SFR genomförs då det utbyggda slutförvaret är driftklart.

BKAB har genomfört en rad studier inför avvecklingen där de viktigaste omfattar:

- Rivning och demontering av hel reaktortank.
- Segmentering av reaktortank och interndelar.
- Aktivitetsinventarium vid rivning av Barsebäck 1 och 2.
- Kartläggning och kategorisering av anläggning och omgivning avseende radioaktiv kontamination.
- Omhändertagande av stora komponenter såsom turbin, kondensator, mellanöverhettare och förvärmare.
- Rivning av reaktorbyggnad.
- Omhändertagande av interndelar.

Därutöver har en 3D-modell skapats över anläggningen som omfattar mark och byggnader.

Pågående studier är:

- Fastställande av kravbild för rivning.
- Rivnings- och avfallslogistik.
- Rivning av turbinbyggnad och övriga byggnader.
- Dekontaminering av byggnadsstrukturer.

BKAB:s planerade studier för kommande Fud-period är:

- Modell för ett friklassningsprogram.
- Rivningsförberedelser avseende servicesystem vid rivning.
- Organisation för nedmontering och rivning.
- Dekontaminering av rör och tankar i avfallsanläggningen.
- Kommunikationsplan för intressenterna.

Under perioden kommer arbetet med framtagande av underlag för ansökan om myndighetstillstånd för nedmontering och rivning att starta.

BKAB bygger vid planeringen upp kompetens inför nedmontering och rivning genom medverkan i följande organisationers arbete inom avvecklingsområdet:

- Samverkansgrupper för avvecklingsfrågor som på SKB:s initiativ etableras för kärntekniska anläggningar. Ett exempel på detta är SKB:s rivningsgrupp.
- Standardiseringsarbete i SIS/TK405 Kärnenergi och i förlängningen internationella standardiseringsorganet ISO.
- Samverkan som har etablerats med SVAFO.
- Erfarenhetsutbyten med E.ON och Vattenfall i Tyskland. Inriktningen är säkerhet, avvecklingskostnader, avvecklingsmetoder och friklassning.
- BKAB antogs under 2007 som fullvärdig medlem av OECD/NEA Technical Advisory Group som träffas två gånger om året och utbyter erfarenheter kring olika avvecklingsprojekt i hela världen.
- Medlemskap i OECD/NEA Working Party on Decommissioning and Dismantling (WPDD).
- Medlemskap i EPRI:s Decommissioning program. Här finns möjlighet att få stöd för att kunna minimera risker och kostnader för avvecklingen genom förfinad planering och erfarenhetsåterföring från genomförda projekt.

Den övergripande planeringen präglas i nuläget av ett antal förstudier som ska sammanställas till ett uppdrag för förprojektering. Under förprojekteringen utförs en fördjupad analys och utvärdering av det i förstudien framtagna materialet. Exempel på innehåll i förprojekterings slutrapport är principlösningar, upphandlingsformer, ekonomiska kalkyler som bygger på budgetofferter, säkerhets- och riskanalyser, miljöaspekter, avfallsplaner, dosbudget samt tidsplaner för avveckling.

Resultatet från förprojekteringen kommer att bilda underlag till projekteringen inför att genomförande av nedmontering och rivning ska inledas. I detta arbete ingår bland annat att ta fram en projektorganisation, göra leverantörsbedömningar, utlysa offertförfrågningar, upphandla entreprenader, kvalitetssäkra, utföra riskanalyser samt hantera tillståndsärenden.

En fastställd kravbild för friklassning av Barsebäcksverket är en förutsättning för att kunna genomföra nedmonteringen och rivningen så säkert, miljöanpassat och effektivt som möjligt så att det kärntekniska tillståndet upphör att gälla för anläggningen. En dialog mellan SSM och BKAB bör ske i god tid för att fastställa kravbild. SSM:s kravbild samt regelverk inför friklassning av Barsebäcksverket är ännu inte helt klarställd. En friklassningsföreskrift för material, lokaler, byggnader och mark har tagits fram av SSM. Föreskriften anger inga friklassningsnivåer för mark utan det ska beslutas av SSM i det enskilda fallet. I dialog mellan BKAB, övriga tillståndshavare och SSM ska följande klarställas:

- De radiologiska kriterierna för friklassning av mark.
- Kontrollprogrammet för friklassning av anläggningen.
- Friklassningsprocessen vid avveckling och rivning av en kärnteknisk anläggning.

9.3.3 Forsmarks Kraftgrupp AB:s planering för avveckling och utveckling av metoder

FKA:s avvecklingsplan omfattar alla tre reaktorläggningar i Forsmark och anger övergripande förutsättningar för kommande avveckling (FKA 2013). Med givna övergripande förutsättningar och som komplement till avvecklingsplanen har SKB och FKA med hjälp av Westinghouse tagit fram en integrerad studie för avveckling av hela anläggningen (SKB 2013c). Syftet med studien är att precisera avfalls- och aktivitetsmängder, tidsplan och organisation. Med detta som underlag har sedan kostnader för nedmontering och rivning beräknats.

En grundläggande planeringsförutsättning är att tiden från det att elproduktionen upphör till dess att platsen är friklassad ska minimeras så långt som det är säkerhetsmässigt, praktiskt och ekonomiskt möjligt. Förstudier och detaljprojektering för nedmontering och rivning måste då genomföras i god tid innan elproduktionen upphör.

Efter slutlig avställning hålls respektive reaktorläggning i avställningsdrift i cirka ett år innan nedmontering och rivning påbörjas. Under denna avställningsdrift vidtas åtgärder för att minska mängden aktivitet i anläggningen, till exempel genom borttransport av kärnbränsle, segmentering av interndelar samt systemdekontamineringar. Detta görs i syfte att kunna påbörja nedmontering och rivning direkt efter avställningsdrift för att därmed uppnå en tidsoptimal avveckling.

Andra grundläggande planeringsförutsättningar är att markförvar finns tillgängligt för deponering av mycket lågaktivt avfall från nedmontering och rivning samt att reaktortankarna kan transporteras och slutförvaras hela.

Målet för avvecklingen är att avlägsna radioaktivt material och återställa respektive reaktorläggning till en friklassad anläggning. Detta anses ha uppnåtts när det inte längre föreligger några restriktioner från SSM för annan användning av mark eller byggnader. Avvecklingens slutmål är att området ska kunna användas för annan industriell verksamhet.

FKA:s planeringsförutsättning är att reaktorerna drivs i 60 år, vilket innebär att Forsmark 1 drivs till 2040, Forsmark 2 till 2041 och Forsmark 3 till 2045. FKA:s planering inför kommande avveckling är att fortsätta samverkan med övriga tillståndshavare och SKB. FKA deltar bland annat i SKB:s rivningsgrupp och Vattenfalls strategiska samarbetsforum inom området avveckling.

Som grund för pågående planeringsarbete inom FKA tillämpas också råd och direktiv från SKB. Rapporten Avveckling och rivning av kärnkraftblock (SKBdoc 1359832) måste speciellt lyftas fram som det dokument som utgör en samsyn och vägledning för FKA, OKG och RAB vad gäller den fortsatta planeringen inom teknik, metoder och organisation.

FKA:s ambition och mål är att avvecklingen ska vara säker, tillförlitlig och kostnadseffektiv. För att uppnå dessa mål fokuseras planeringen för närvarande på tre områden:

- Upprätthålla och utveckla kompetens genom att säkra en hög nivå på egen kompetens. Nyckelkompetenser ska finnas internt och generationsväxlingar ska kunna ske utan att viktiga erfarenheter förloras.
- Levande avvecklingsplanering som regelbundet ska följas upp och hållas aktuell utifrån ny kunskap och nya erfarenheter. Detta i syfte att vid varje given tidpunkt ha en optimal och kostnadseffektiv avvecklingsplanering.
- Bygga förtroende internt och externt genom att delge relevant information kring pågående och planerat arbete avseende avveckling, nedmontering och rivning av reaktorläggningarna. Detta görs sakligt och strukturerat, såväl internt inom FKA som externt.

9.3.4 OKG Aktiebolags planering för avveckling och utveckling av metoder

I samband med de genomförda effekthöjningsprojekten har OKG utvecklat och verifierat arbets sättet för omhändertagande av stora komponenter. Exempelvis har interndelar kapats, emballerats och transporterats till OKG:s berggrum för avfall (BFA) för mellanlagring. Dessutom har stora

komponenter såsom turbinen från O3 demonterats, emballerats, transporterats, smälts och friklassats. Logistik och planering av hela flödet har verifierats. Detta kommer även fortsättningsvis att utvecklas i pågående effekthöjningsprojekt.

Oskarshamnsverket har fortsatt sin utveckling av systemdekontaminering och har haft ett samarbete med kärnkraftverken i Barsebäck och Forsmark kring detta. Branschens gemensamma erfarenhet från dekontaminering av ASEA BWR-reaktorer är därmed stor. De faktorer för dekontaminering som erhållits vid större systemdekontamineringar har förbättrats avsevärt genom åren och resulterat i reducering av aktivitet med 95–99 procent.

OKG:s planerade drifttid för samtliga reaktorblock är 60 år (OKG 2013). Det innebär att avstängning sker 2032 för O1, 2034 för O2 samt 2045 för O3. Arbetet med avvecklingen kommer att pågå under en 20-årsperiod.

Utredningar och erfarenheter kommer att ligga till grund för den förstudie och detaljprojektering som genomförs inför avveckling innan elproduktionen upphör. I god tid före avveckling kommer upphandling av leverantörer att genomföras.

Tiden, från det att elproduktionen upphör till dess att platsen är friklassad, minimeras genom att i förväg ha genomfört en god planering och upprättat avfallsströmmar till slutförvar.

Redan under perioden avställningsdrift för ett reaktorblock kommer åtgärder att vidtas för att minska mängden aktivitet och därmed sänka kravnivån i anläggningen. Detta kommer att göras så att säkerheten och driften för de anläggningar som är i drift inte riskeras. Exempel på sådana aktiviteter är borttransport av kärnbränsle, segmentering och borttransport av interndelar samt systemdekontaminering. Detta innebär att vissa moment av nedmontering och rivning kan startas när blocket är avställt.

Avställningsdriften bedöms till cirka ett år. Ingen tid för servicedrift eller återetablering planeras. Detta är en följd av att den inledande planeringen och projekteringen inför avställning möjliggör att nedmontering och rivning startar parallellt med åtgärder under avställningen. OKG planerar för att markförvar, motsvarande redan existerande markförvarsanläggning, finns tillgängligt för deponering av avfall från nedmontering och rivning. Reaktortankar planeras att tas ur hela från anläggningen, utan interndelar, för att transporteras och slutförvaras som hela, stora komponenter. Slutmålet för OKG:s anläggning är att området ska friklassas och kunna användas för annan industriell verksamhet.

OKG:s planering inför kommande avveckling är att fortsätta samverkan med övriga tillståndshavare och SKB för att diskutera avvecklingsfrågor. Denna samverkan sker främst med SKB som sammanställande. Samverkan med E.ON för utbyte av erfarenheter och kompetens inom området är en annan viktig aktivitet. Exempelvis tas en kompetensmatris fram där de kompetenser anges som E.ON, BKAB och OKG med eventuella underleverantörer besitter inom området. OKG kommer även att följa avvecklingen av Barsebäckverket för att ta del av de lärdomar och erfarenheter som erhålls, i synnerhet inför avvecklingen av O2-reaktorn.

Parallellt med den genomförda platsspecifika studien för avveckling (SKB 2013d) har även Oskarshamnsverkets avvecklingsplan uppdaterats under 2013 (OKG 2013). Avvecklingsplanen kommer regelbundet att ses över och vidareutvecklas ju närmare tidpunkten för avställning och efterföljande avveckling kommer.

OKG kommer att genomföra systemdekontamineringar i sina anläggningar och närvara vid systemdekontamineringar på reaktorerna i Ringhals och på bassängerna i Clab under kommande Fud-period. Erfarenheter från dessa aktiviteter kommer att tillvaratas i avvecklingsplaneringen och bidra till att bibehålla och utveckla kompetens inom området.

9.3.5 Ringhals AB:s planering för avveckling och utveckling av metoder

RAB planerar i nuläget för säker drift av reaktorerna R1/R2 i 50 år och R3/R4 i 60 år, vilket innebär drift av samtliga reaktorer i ytterligare 13–30 år (R2 stängs 2025, R1 2026, R3 2041 och R4 2043). Målet med den påföljande avvecklingen är att avlägsna radioaktivt material och att återställa platsen så att annan industriell verksamhet kan ske där.

RAB:s strategi är att avvecklingen ska vara säker, optimerad och kostnadseffektiv. För att uppnå dessa mål fokuserar avvecklingsplaneringen för närvarande på ett antal strategiska områden. Dessa områden omfattar bland annat att säkra en hög egen kompetens, så att nyckelkompetenser inom avvecklingsområdet finns internt och att generationsväxlingar kan ske utan att viktiga erfarenheter förloras. Dessutom följs avvecklingsplanen regelbundet upp och optimeras utifrån ny kunskap och nya erfarenheter för att vid varje given tidpunkt ha en optimal avvecklingsplanering. Därutöver ges öppen och relevant information kring pågående och kommande arbete inom avvecklingsplanering för att bygga förtroende såväl internt som externt, vilken levereras riktat och strukturerat.

Avgörande förutsättningar, som behövs för att kunna genomföra en lyckad avveckling, har identifierats. Dessa diskuteras i följande tre stycken och omfattar kategorierna dokumentation, avfall respektive verksamhet. RAB arbetar för närvarande målinriktat för att se till att förutsättningarna etableras i rimlig tid innan avvecklingen av första blocket inleds.

En 3D-modell av sluttillståndet hos respektive reaktorblock och över anläggningen som helhet kommer att finnas tillgänglig vid slutlig avställning. Driftdata, historiska händelser och erfarenheter från driften som är relevanta för avvecklingen kommer att finnas dokumenterade. En detaljerad aktivitetsinventering finns sammanställd för respektive anläggning vid slutlig avställning. Denna är även integrerad i då befintlig 3D-modell, vilket möjliggör effektiv dosoptimering.

Håligheter kommer att fyllas med massor från nedmontering och rivning upp till en meter under markytan. Markförvar kommer att finnas tillgängligt för deponering av mycket lågaktivt avfall från nedmontering och rivning. SFR har dimensionerats för att kunna ta emot allt kortlivat avfall från nedmontering och rivning. Friklassning kommer att ske enligt rutiner anpassade för de volymer, aktivitetsnivåer och materialflöden som väntas vid nedmontering och rivning. Avklingningslagring av avfallskollin kan vid behov utnyttjas. Samtliga reaktortankar planeras att slutförvaras hela, BWR-tanken i SFR och PWR-tankarna i SFL. RAB:s planeringsinriktning är att samtliga PWR-interna delar ska kunna slutförvaras i reaktortanken. När den kärntekniska verksamheten slutligen upphört på hela förläggningsplatsen ska kvarvarande byggnader och mark kunna användas för annan industriell verksamhet. Beslut fattas i så pass god tid före avställning, att detaljerad avvecklingsplanering kan ske under kvarvarande drift fram till slutlig avställning. Allt bränsle tas bort från anläggningen inom ett år efter slutlig avställning. Avvecklingen av respektive reaktor sker i projektform och styrning sker genom en beställarorganisation inom RAB. RAB har som mål att successivt bygga upp erforderlig kompetens inom avvecklingsområdet och att utgöra en kompetent beställare av avvecklingsprojekten. Projekten är vid start väl definierade och välplanerade av beställaren (RAB). RAB:s huvudverksamhet som beställare är att sörja för projektens infrastruktur. Experter med kännedom kring avvecklingen och dess planering i sin helhet kommer att finnas på RAB. Arbete inom projekt utförs huvudsakligen av externa entreprenörer. Strålskydd och fysiskt skydd anpassas till rådande risknivå under avvecklingens olika skeden.

Under kommande Fud-period kommer fokus för RAB:s utvecklingsarbete inom avvecklingsområdet att omfatta följande områden:

- Kompetenssäkring och -uppbyggnad – RAB har påbörjat kompetensuppbyggnaden inom området i och med etablerandet av en avvecklingsplaneringsgrupp. Gruppen har som mål att tillvarata relevanta erfarenheter från egen driftpersonal såväl som erfarenheter från nationella och internationella avvecklingsprojekt. Målet är att bygga kompetens så att RAB blir en kompetent beställare av avvecklingsprojekt.
- Anläggningsinventering – kartläggning av komponenter, byggnader och system kommer att genomföras med målet att inför nästa bestämning av avfallsvolymer från nedmontering och rivning ha ett underlag med successivt mindre osäkerheter att utgå ifrån.
- Aktivitetsinventarium vid nedmontering och rivning – RAB avser att bidra till kompetensbyggande inom områdena för nuklidinventariemodellering, bestämning av källstyrka och nuklidvektorframtagning. Vidare kommer RAB sörja för att en successivt förbättrad kartläggning av radioaktivitet och en beräkningsmodell för RAB:s anläggningar tas fram.
- Friklassning – kraven vid friklassning av rivningsavfall kommer att bli styrande parametrar för hur avvecklingen genomförs. Rimlighet, BAT och ALARA antas vara avgörande parametrar under framarbetandet av dessa krav. En praxis gällande friklassningsmätningar under avvecklingen kommer att tas fram.

- Typbeskrivningar – Förutsättningar för att konvertera befintliga typbeskrivningar till att även inkludera avfall från nedmontering och rivning kommer att undersökas. RAB kommer att stödja SKB i detta arbete.
- Deponering av hela tankar med interndelar – BWR- och PWR-tankar förutsätts deponeras hela. Översiktliga analyser av konsekvenser vid samdeponering av interndelar på plats i reaktor-tankarna kommer att genomföras.
- Markdeponering av avfall från nedmontering och rivning – RAB:s planeringsförutsättning är att ett markförvar kommer att kunna ta emot allt avfall från nedmontering och rivning som faller inom kategorin mycket lågaktivt avfall och som i övrigt uppfyller dagens krav på markförvaring. Förvaret antas för närvarande ligga i anslutning till RAB:s anläggningar, men ett nationellt markförvar för avfall från nedmontering och rivning antas kunna ersätta det lokala utan att påverka avvecklingsstrategin gällande detta avfall i övrigt.
- Avklingningslager (mellanlager) kommer eventuellt att kunna bidra till en optimal avvecklingsstrategi genom att erbjuda en kortare tids avklingningslagring. Detta är beroende av system- och byggnadsytornas kontamineringsgrad och radionuklidsammansättning efter genomförd dekontaminering samt ytterligare avfallsbehandling. RAB kommer därför under kommande år att se över förutsättningarna för avklingningslagring dels av medelaktivt avfall som befinner sig nära gränsvärdet för omklassning till lågaktivt, dels av lågaktivt avfall som befinner sig nära gränsvärdet för markförvaring.

9.3.6 Ågestas planering för avveckling och utveckling av metoder

Vattenfall AB har gett SVAFO i uppdrag att ombesörja pågående servicedrift samt avvecklingsplanering för kärnkraftverket Ågesta. Allt bränsle och tungt vatten har avlägsnats från anläggningen. Två av fyra ånggeneratorer har tidigare tagits ut och behandlats i smältanläggningen i Studsvik, varpå göten kunde friklassas. Huvuddelen av återstående aktivitet finns i reaktortanken och dess interndelar. I övrigt kommer merparten av avfallet från nedmontering och rivning att härröra från de två ånggeneratorerna, styrdonen och de primära rörsystemen. Dieselgeneratoraggregat och batterier har också avlägsnats. I övrigt är de flesta system och utrustningar intakta, exempelvis är bergdränaget fortfarande i drift. Uppföljning och tillsyn sker enligt givna strålskyddsvillkor och viss utrustning, såsom lyftanordningar, underhålls för att underlätta en framtida nedmontering och rivning av anläggningen.

Underlag i form av förväntade avfalls- och aktivitetsmängder vid avvecklingen av Ågesta har tagits fram till projekt SFR-utbyggnad. Underlaget lämnades in till SKB i slutet av 2010.

En ansökan om friklassning av flertalet byggnader och områden utanför reaktorinneslutningen i Ågesta lämnades in till SSM under 2010.

Under 2011–2012 lät Vattenfall genomföra en ny studie för avveckling av Ågesta (Lindow 2012). Studien innefattar en översiktlig tidsplanering samt en kostnadsuppskattning av nedmontering och rivning av samtliga byggnadsdelar i berggrummet (inklusive anslutningstunnlar) samt kontrollrums- och ställverksbyggnaden. Studien för Ågesta skickades in till SSM under hösten 2012.

Servicekraften fortsätter fram till dess att nedmontering och rivning startar. Nedmontering och rivning planeras att starta före utgången av 2020. Under 2012 uppdaterades avvecklingsstrategin för Ågesta, och under 2013 uppdaterades avvecklingsplanen (Hedvall 2013). Uppdatering av avvecklingsplanen förväntas ske stegvis fram till start av nedmontering och rivning då en kompletterad avvecklingsplan kommer att redovisas. Målet med nedmontering och rivning av kärnkraftverket Ågesta är att uppnå en helt friklassad anläggning (inklusive markområdet och berggrummet) och att det radioaktiva avfallet därmed avlägsnats.

Att tidigarelägga avvecklingen av Ågesta är troligen möjligt, men skulle bland annat innebära att avfallet från nedmontering och rivning måste transporteras till och mellanlagras på en annan plats. Beroende på när SFR blir tillgängligt för deponering av avfall från nedmontering och rivning kan detta vara ett alternativ, som kopplar till de studier kring logistik och framtagande av avfallsplan som kommer att ske under kommande Fud-period. Avvecklingen av Ågesta behöver även analyseras med avseende på eventuella andra pågående större avvecklingsprojekt inom branschen och deras påverkan på resurstillgången hos leverantörer och andra berörda parter.

Under åren fram till start av nedmontering och rivning av Ågesta kommer förstudie- och planeringsarbete att ske. En arbetsgrupp har under 2013 bildats för att arbeta med förstudier och avvecklingsplanering.

I nuvarande avvecklingsplan och i studien för avveckling av Ågesta redovisas segmentering av reaktortanken som huvudalternativet. Transport och deponering i slutförvar av hel reaktortank beskrivs som ett alternativt scenario. Alternativet med hel tank betraktas som fördelaktigt, bland annat utifrån ett ALARA-perspektiv. En fördjupad studie av hanteringen av reaktortanken kommer därför att genomföras under perioden fram till och med 2017.

Logistik är en viktig fråga vid planeringen av nedmontering och rivning. Kärnkraftverket Ågesta ligger, till skillnad från övriga reaktorer, inte i anslutning till en hamn. Avfallet från nedmonteringen och rivningen kommer att behöva transporteras med lastbil på allmän väg. Avfallstransporterna måste studeras vidare för att tillse att en säker och smidig logistislösning kan uppnås. Logistikstudier kommer att genomföras under kommande år.

Optimering av avfallsflödet vid nedmontering och rivning av Ågesta är ett område som kommer att utredas djupare under åren innan avvecklingen startar. Frågeställningar som kommer att beaktas vid optimeringen inkluderar möjligheter till dekontaminering på plats i Ågesta eller hos SVAFO i Studsvik samt behandling av avfallet hos en extern aktör. Friklassning av avfall är en annan viktig aspekt, inklusive kravbild för friklassning, som kommer att studeras närmare under kommande år.

Åtgärder kommer att vidtas för att undvika stråldoser till omgivningen och minimera dosbidrag till personalen, i enlighet med ALARA-principen. En radiologisk kartläggning kommer att genomföras fram till och med 2017 i syfte att ge ytterligare underlag till avvecklingsplaneringen.

Arbete med miljökonsekvensbeskrivning, avvecklingsplan, säkerhetsredovisning, avfallsplan och rapport enligt Euratomavtalets artikel 37 kommer att ske under perioden fram till 2020.

Vattenfall och SVAFO medverkar i SKB:s rivningsgrupp och deltar därigenom i det branschgemensamma utvecklingsarbetet som rör avvecklingsfrågor. SVAFO medverkar även i OECD/NEA:s internationella forum för erfarenhetsåterföring från avvecklingsprojekt runt om i världen.

Erfarenheter från tidigare avvecklingsprojekt visar att mängden mätningar (materialprover, luftmätningar, dosratsmätningar och dylikt) som behövs har ökat sedan 1980-talet. Erfarenheten är också att onödiga mätningar görs när det saknas en tillräckligt tydlig överblick av tidigare resultat. Bättre verktyg för dokumentation och visualisering av mätresultat behövs. Utveckling av dokumentations- och visualiseringsverktyg är något som därför ingår i avvecklingsplanering för Ågesta.

9.3.7 Planering för avveckling av SKB:s kärntekniska anläggningar

Clink

SKB är tillståndshavare för Clab och kommer även fortsättningsvis att vara det när integreringen av den planerade inkapslingsdelen är klar och anläggningen i stället benämns Clink. Avvecklingsplanen för Clink (Hallberg och Eriksson 2008) uppdateras under 2013 i samband med hanteringen av kompletteringar gällande ansökan för Clink. Clink kommer att avvecklas när allt använt kärnbränsle kapslats in och deponerats i Kärnbränsleförvaret. Tidsplanen är beroende av när den sista kärnkraftsreaktorn tas ur drift. Enligt nuvarande planering skulle avvecklingen av Clink kunna inledas omkring 2070 och vara avslutad inom 5–7 år.

Under arbetet med att ta fram avvecklingsplanen för Clink har det inte framkommit något motiv till att avvecklingen skulle bli mer komplicerad än för övriga kärntekniska anläggningar vars avveckling ligger närmare i tiden. Nedmonteringen och rivningen bör kunna genomföras med låg dos till personal och mängden kort- och långlivat radioaktivt avfall som uppstår beräknas bli begränsad. Avfallet från nedmontering och rivning ska enligt gällande planer skickas till SFR för slutförvaring.

Målet med avvecklingen är att avlägsna radioaktivt material och återställa Clink till en friklassad anläggning. Detta innebär att byggnader inklusive all utrustning och mark ska friklassas.

SKB har under 2013 tagit fram en studie för avveckling av Clink i syfte att ge underlag till utbyggnaden av SFR gällande avfallsinventarium samt som kostnadsuppskattning för Plan 2013.

SFR

SKB har under 2012–2013 inför ansökan enligt kärntekniklagen för utbyggnad av SFR tagit fram en ny avvecklingsplan för SFR.

Avvecklingen av SFR påbörjas när den huvudsakliga verksamheten upphör med syfte att inte återupptas. Den fortsätter, till dess att anläggningen ovan mark är friklassad och radiologiska skäl inte förhindrar etablering av annan industriell verksamhet på platsen. De anläggningsdelar som kan bli föremål för rivning i samband med avveckling (ovanmarksdelarna) betraktas som konventionella då de inte innehåller något radioaktivt material. En radiologisk kartläggning av anläggningen kommer att behöva göras för att utesluta eventuell kontaminering av byggnadsdelar som varit i kontakt med avfallsbehållare under drift, exempelvis terminalbyggnaden. Målet med avvecklingen är att enligt definition uppnå en friklassad anläggning. Hur långt rivningen ska bedrivas beror därefter främst på den fortsatta användningen av anläggningsområdet.

Tidsplanen för när SFR ska avvecklas är kopplad till när de sista, nu befintliga, kärnkraftverken och SKB:s övriga kärntekniska anläggningar är demonterade och friklassade. Nuvarande planer avser 50–60 års drift av kärnkraftverken och ytterligare några år för Clink. Rivningen av SFR skulle därmed kunna inledas i mitten av 2070-talet.

SFL

Ingen avvecklingsplan finns ännu framtagen för SFL, eftersom utformningen av detta slutförvar befinner sig på konceptstadiet.

Kärnbränsleförvaret

En avvecklingsplan för Kärnbränsleförvaret finns framtagen och ingår i ansökan enligt kärntekniklagen om slutförvaring av använt kärnbränsle och enligt miljöbalken för KBS-3-systemet (Hallberg och Tiberg 2010).

Avvecklingen vidtar efter det att den huvudsakliga driften avslutats, det vill säga när allt använt kärnbränsle deponerats och deponeringstunnlarna, återfyllts och pluggats. Avvecklingen innebär förslutning av återstående delar av undermarksdelen och rivning av ovanmarksdelen. Förslutningen av undermarksdelarna är en del av förvarets barriärfunktion och av betydelse för säkerheten på lång sikt. SKB:s arbete med förslutning beskrivs i avsnitt 13.2.4 (Förslutning).

När avvecklingen startar kommer det inte att finnas någon kontamination i anläggningen. Rivningen utförs därför som för en konventionell anläggning. Det konventionella avfallet sorteras och återvinns i möjligaste mån, eller läggs på deponi. Farligt avfall hanteras i enlighet med gällande bestämmelser. En markundersökning genomförs därefter, och ligger till grund för efterbehandling av området.

9.3.8 SKB:s planering för avveckling och utveckling av metoder

Studier kring avveckling av kärnkraftverk har genomförts i SKB:s regi i samarbete med kärnkraftsföretagen under mer än 20 år. Studierna har tidigare baserats på att en referensanläggning har utsetts för BWR- respektive PWR-anläggningarna. För referensanläggningarna har detaljerade studier för avveckling genomförts och resultaten har därefter överförts till övriga anläggningar. Strategier och teknik har sammanställts och dessa antas vara desamma för alla kärnkraftsblocken. För att kunna dimensionera SKB:s system och för kostnadsuppskattningar till Plan 2013 har platsspecifika studier för avveckling tagits fram i samarbete mellan SKB och kärnkraftsföretagen. Därmed bygger dimensioneringar och kostnader nu på specifika förutsättningar för respektive anläggning i stället för användandet av referensanläggningar.

FKA, OKG och RAB redovisar i sina avvecklingsplaner att markförvar för det mycket lågaktiva avfallet från nedmontering och rivning ska finnas tillgängligt. Ett projekt har startats under 2013 för att kunna fatta beslut om inriktning i frågan, se kapitel 7.

Ur en nationell synvinkel behövs en samordning av avvecklingsfrågorna mellan de kärntekniska anläggningarna. För att kunna säkerställa att hela kedjan från avvecklingsplanering till slutförvaring av avfallet optimeras behövs ytterligare samordning. En rivningsgrupp med representanter från kärnkraftsföretagen, Studsvik Nuclear AB, SVAFO och SKB bildades i början av 2000-talet då behovet av att hantera avvecklings- och rivningsfrågor i ett gemensamt forum växte fram. Syftet med gruppen är att den ska fokusera på teknik- och logistikfrågor i samband med avveckling av kärntekniska anläggningar och exempelvis diskutera val av olika tekniska lösningar för behandling och hantering av avfall.

Såväl planeringen för avveckling inom branschen som SKB:s arbete med dimensionering av slutförvar intensifieras avsevärt under kommande Fud-period. I och med detta kommer grupperingar mellan kärnkraftverken och SKB att ses över för att skilja på informativa och beslutsfattande forum.

Frågor som SKB kommer att driva tillsammans med kärnkraftverken om avveckling under kommande Fud-period kommer till stor del att vara av teknisk karaktär. Detta omfattar bland annat arbete med typbeskrivningar för det framtida avfallet från nedmontering och rivning, fastläggande av behållare för avfallet och dess acceptanskriterier samt att se över möjligheten till markförvaring av det mycket lågaktiva avfallet. En annan viktig och betydande fråga är vilka krav som gäller inom avveckling, dels under planeringsstadiet, dels vid den framtida nedmonteringen och rivningen. Två konkreta områden som SKB kommer att arbeta med är att uppdatera och se över guiden för framtagande av avvecklingsplan (SKB 2004) samt att klarlägga friklassningsprocessen vid avveckling.

SKB bevakar och deltar i det internationella utvecklingsarbete som pågår inom avveckling och teknik för nedmontering och rivning genom deltagande i OECD/NEA:s samarbetsprogram och IAEA:s program. Arbete bedrivs inom OECD/NEA i gruppen Working Party on Decommissioning and Dismantling (WPDD) och inom IAEA i gruppen International Decommissioning Network (IDN). SKB kommer även fortsättningsvis att delta i dessa nätverk och har nu möjlighet till ett fördjupat utbyte i och med att platsspecifika studier för avveckling finns framtagna för Sveriges samtliga kärnkraftverk.

En av de viktigaste aktiviteterna vid nedmontering och rivning av en kärnteknisk anläggning är den efterföljande friklassningen, det vill säga att den kan undantas från fortsatt kontroll ur strålsäkerhetssynpunkt.

SSM:s friklassningsföreskrifter för material, lokaler, byggnader och mark (SSMFS 2011:2) kräver att tillståndshavaren på ett strukturerat sätt genomför kontroller för att påvisa att förekomsten av radioaktiva ämnen inte är högre än de friklassningsnivåer som anges i föreskrifterna eller på annat sätt av SSM. Även föreskriften SSMFS 2008:1 innehåller viktiga förutsättningar för att uppfylla kravet på friklassning.

Det finns mycket att vinna på en väldefinierad och av alla parter accepterad och godkänd friklassningsprocess. Exempelvis ger det ett högt förtroende i omvärlden då tillståndshavarna i detalj kan redovisa hur man gått tillväga vid friklassning och redovisar tillförlitliga resultat från gjorda mätningar. Övriga fördelar detta medför är bland annat kostnadseffektivitet och att tidsplaner kan hållas, eftersom risken för oförutsedda händelser minskar och därmed även risken för oförutsedda kostnader.

En viktig drivkraft är också att hushålla med de resurser som avsatts för avvecklingen av kärnkraftverken genom en rationell hantering av friklassningsprocessen.

Ett projekt i SKB:s regi inleddes under 2013 med målet att ta fram en väldefinierad och av den kärntekniska industrin accepterad friklassningsprocess vid nedmontering och rivning av svenska kärntekniska anläggningar. Avsikten är att redovisa resultaten i en allmänt tillgänglig SKB-rapport i form av en handbok som respektive tillståndshavare kan referera till i sin planering och vid genomförandet av avveckling. Detta arbete beräknas vara avslutat i början av 2015.

Del III

Använt kärnbränsle

- 10 Översikt
- 11 Teknikutveckling bränslehantering
- 12 Teknikutveckling kapsel
- 13 Teknikutveckling buffert, återfyllning och förslutning
- 14 Teknikutveckling berg
- 15 Tekniska system
- 16 Horisontell deponering – KBS-3H

10 Översikt

10.1 Introduktion

Helt centralt i SKB:s verksamhet är säkert omhändertagande av det använda kärnbränslet. Den övergripande planeringen samt handlingsplanen för att projektera och uppföra kommande anläggningar i slutförvarssystemet beskrivs i avsnitt 2.3 Handlingsplan för använt kärnbränsle.

Del III av Fud-program 2013 fokuserar på den teknikutveckling som behövs för att kunna projektera, uppföra och driva slutförvarssystemet för använt kärnbränsle på ett rationellt sätt samtidigt som kraven på långsiktig säkerhet, låg stråldos vid drift av anläggningarna samt god yttre miljö uppfylls. Som framgår av de inlämnade ansökningarna för Kärnbränsleförvaret och Clink har en referensutformning som uppfyller konstruktionsförutsättningarna för KBS-3-systemet fastställts (SKB 2011a, c). Samtidigt har en genomförbar väg mot produktion och kontrollprogram påvisats. Fortsatt teknikutveckling görs för att gå från principiösningarna i ansökningarna till lösningar som är anpassade till en industrialiserad process med fastställda krav på kvalitet, kostnad och tidsåtgång. En stor del av det återstående utvecklingsarbetet består av att bygga upp produktionssystemet med dess kvalitetskontroller.

I detta kapitel redovisas hur teknikutvecklingen styrs för att säkerställa att teknik som uppfyller ställda krav levereras i takt med behoven under projektering, uppförande och driftsättning av slutförvarssystemets anläggningar. Vidare ges en översikt av mål och omfattning för teknikutvecklingen avseende de olika barriärerna i Kärnbränsleförvaret. Det konkreta utvecklingsarbetet för respektive barriär för slutförvarets långsiktiga säkerhet redovisas i efterföljande kapitel. Uppgradering av Clab beskrivs i kapitel 2.

Utvecklingsarbetet kräver omfattande tekniska resurser. SKB:s egna laboratorier – Äspölaboratoriet, Kapsellaboratoriet och Bentonitlaboratoriet – är byggda och utrustade för tester, demonstrationer och generalrepetitioner i full skala. Huvuddelen av denna typ av utvecklingsinsatser kommer att utföras vid dessa anläggningar. Vissa tester kan dessutom, i samarbete med Posiva, genomföras vid Posivas berganläggning Onkalo, belägen i Olkiluoto i Finland. Vidare finns laboratorier i berg och för metallurgisk forskning tillgängliga i Europa och övriga världen. Därtill kommer industrianläggningar i många länder, med tillgång till kunskaper och resurser att göra utvecklingsinsatser för SKB.

Berggrunden i Forsmark skiljer sig i viktiga avseenden från den i Äspölaboratoriet. I Forsmark är bergspänningarna högre och vattengenomsläppligheten på förvarsdjup betydligt lägre än i Äspös berggrund. Dessa och andra skillnader behöver beaktas i utvecklingsarbetet, men hindrar inte att Äspölaboratoriet förblir en viktig resurs för forskning, utveckling och demonstration som kräver undermarksmiljö på relevant djup. Vidare intensifierar SKB samarbetet med Posiva och vissa försök kan komma att genomföras i Onkalo, där bergförhållandena i flera avseenden liknar dem som råder i Forsmark. Inom flera områden, exempelvis tillverkning och kontroll av kapslar, borring av deponeringshål samt framtagning av transportfordon och hanteringsmaskiner är utvecklingsarbetet mer eller mindre oberoende av skillnader i bergförhållanden.

10.2 Utgångspunkter för teknikutveckling

Den struktur med uppdelning av teknikutvecklingen i ett antal så kallade produktionslinjer, som SKB presenterade i Fud-program 2007 och i Fud-program 2010, ligger kvar och vidareutvecklas. Strukturen innebär att utvecklingsarbetet genomförs inom produktionslinjer för bränsle, kapsel, buffert, återfyllning, förslutning och bergutrymmen. För buffert, återfyllning och förslutning finns flera gemensamma frågeställningar och därför integreras utvecklingen för dessa produktionslinjer. Detta är också anledningen till att dessa linjer nu redovisas i samma kapitel, kapitel 13. Vidare utvecklas tekniska system, exempelvis logistik samt maskiner som är unika för slutförvarsanläggningen och som därmed inte finns att tillgå på marknaden. Detta redovisas i ett eget kapitel för detta, kapitel 15.

10.2.1 Konstruktionsförutsättningar

Konstruktionsförutsättningar avser krav som KBS-3-systemets anläggningar med sina barriärer behöver uppfylla för att säkerställa säkerhet både under drift och efter förslutning. Konstruktionsförutsättningarna specificerar bland annat vilka mekaniska laster barriärerna måste kunna motstå, begränsningar rörande barriärmaterialens sammansättning och egenskaper, acceptabla avvikelser av barriärernas dimensioner samt acceptanskriterier för de olika utrymmena under mark.

En första uppsättning av konstruktionsförutsättningar och andra krav anges i ansökningarna för uppförande av Kärnbränsleförvaret och inkapslingsdelen av Clink. Konstruktionsförutsättningar avseende långsiktig säkerhet redovisas i rapporten (SKB 2009a). Konstruktionsförutsättningar avseende driftsäkerhet redovisas i SR-Drift kapitel 3 för slutförvarsanläggningen (SKBdoc 1091554) respektive PSAR kapitel 3 för Clinkanläggningen. Konstruktionsförutsättningar för olika produktionslinjer redovisas i kapitel 2 i de olika så kallade produktionsrapporterna (SKB 2010e, f, g, h, i). Utöver detta finns övergripande konstruktionsförutsättningar för Kärnbränsleförvaret som redovisas i Repository production report (SKB 2010c). De krav som ställs på val av bränsleelement för inkapsling redovisas i Spent fuel report (SKB 2010d).

Det går inte att från början ange alla detaljerade konstruktionsförutsättningar på en viss produkt eller process, utan krav, teknikutveckling och säkerhetsanalys måste i stället tas fram successivt. En revidering av de konstruktionsförutsättningar som redovisades i ansökningarna genomförs nu baserat på erfarenheter från arbetet med produktionsrapporterna och de säkerhetsanalyser som gjordes inför ansökningarna samt relevanta synpunkter som framkommit under tillståndsprövningen. Avstämning görs mellan konstruktionsförutsättningar för drift, säkerhet efter förslutning och för olika produktionslinjer för respektive barriär så att referensutformningen för KBS-3-systemet och dess delsystem överensstämmer med konstruktionsförutsättningarna.

De grundläggande principerna för avvägning av konstruktionsförutsättningar som berör flera barriärer i Kärnbränsleförvaret är att:

- Sammantagna ska konstruktionsförutsättningarna leda till uppfyllda krav som avser hela Kärnbränsleförvarets säkerhet.
- Konstruktionsförutsättningarna ska vara praktiskt uppnåeliga och verifierbara för samtliga berörda barriärer.
- Konstruktionsförutsättningar som innebär enkla, robusta och effektiva lösningar är att föredra.

Dessa principer används för att ta fram sammanvägda krav för bränsle, kapsel, buffert, återfyllning, förslutning och bergutrymmen. De reviderade konstruktionsförutsättningarna blir underlag för de preliminära säkerhetsredovisningar som SKB tar fram inför byggstart av Kärnbränsleförvaret och inkapslingsdelen av Clink. De kommer att redovisas till SSM i samband med att PSAR lämnas in.

Ytterligare revision av konstruktionsförutsättningarna kommer att göras, dels i förhållande till de villkor som ges i samband med prövningen av tillståndsansökningarna, dels i samband med att säkerhetsredovisningarna förnyas. Ytterligare detaljering eller förändrad avvägning av krav mellan olika system kan även behöva göras under detaljkonstruktion eller inför implementering.

10.2.2 Kvalitetsstyrning och kontroll

Med kvalitetsstyrning och kontroll avses de åtgärder som behöver utföras för att säkerställa och ge tilltro till att de krav som ställs på anläggningarna under drift och efter förslutning av Kärnbränsleförvaret uppfylls. Målet är att erhållna resultat ska uppfylla de acceptabla värdena för egenskaper som bidrar till säkerhet och strålskydd.

Planerad produktion samt styrning och kvalitetskontroller i produktionen av barriärerna för långsiktig säkerhet har övergripande redovisats i produktionsrapporterna. I takt med att produktions- och provningsmetoder utvecklas vidare, kommer även arbetet med kvalitetsstyrning och kontroll att fortskrida. System för kvalitetsstyrning och kontroll kommer att upprättas och implementeras för att kvalitetssäkra produktionen av barriärerna.

Ett antal viktiga aktiviteter i denna process är att:

- Fastställa principer för säkerhets- och kvalitetsklassning.
- Fastställa vad som ska kvalitetsstyras och kontrolleras, när kvalitetsstyrning och kontroll ska genomföras och av vem i termer av första, andra och tredje part.
- Fastställa och kvalificera processer, metoder, utrustningar och personal för tillverkning och installation, provning och kontroll.
- Fastställa de rutiner som ska tillämpas i produktionen för att försäkra sig om att KBS-3-förvaret uppfyller kvalitetskrav.

10.2.3 Leveransstyrmodell

För att styra det forsknings-, utvecklings- och demonstrationsarbete som behövs för att driftsätta anläggningarna för inkapsling och slutförvaring av använt kärnbränsle, behöver arbetet struktureras med milstolpar för resultat och successiv låsning av förutsättningar. För att få en gemensam struktur och nomenklatur för detta ändamål, har SKB tagit fram en leveransstyrmodell. Modellen presenterades i Fud-program 2010 och har nu tillämpats och utvecklats inom de olika teknikutvecklingsprojekt som bedrivs eller planeras.

Enligt leveransstyrmodellen indelas teknikutvecklingen i fyra faser:

- Konceptfas.
- Konstruktionsfas (systemkonstruktion och detaljkonstruktion).
- Implementeringsfas.
- Drift- och underhållsfas.

För varje fas finns en specifikation för vad som ska ha uppnåtts och vad som därmed ska föreligga som underlag för beslut om att gå vidare med nästa fas i utvecklingen. I avsnitt 10.3 redovisas hur långt teknikutvecklingen måste ha kommit inför några av de viktigaste milstolparna i det återstående arbetet med att projektera och uppföra KBS-3-systemets anläggningar. Konceptfasen passerades i de flesta fall i och med inlämnandet av ansökningarna.

Syftet med konstruktionsfasen är att ta fram en konstruktion av systemet, att verifiera att den uppfyller kraven samt att ta fram förslag avseende produktion, implementering, drift, kontroll och underhåll av systemet. Referensutformningen från konceptfasen samt konstruktionsförutsättningar och andra krav utgör utgångspunkten för utvecklingen under konstruktionsfasen. Resultatet av konstruktionsarbetet utgör bland annat en mer detaljerad, eller ibland reviderad, referensutformning. Efter genomförd system- respektive detaljkonstruktion fattas beslut om uppdaterad referensutformning. Konstruktionsfasen kan vara iterativ, då det kan visa sig att föreslagen lösning inte uppfyller kraven eller inte kan produceras eller kontrolleras på ett kostnadseffektivt sätt.

Syftet med implementeringsfasen är att bygga upp och färdigställa produktionssystemet, tillverka, installera och testa utvecklade system i anläggningen och dess organisation. Under implementeringen ska tillverkningsprocesser och provningsmetoder, med därtill hörande utrustning och personal, kvalificeras för att verifiera att de kan uppfylla sina uppgifter. Den driftorganisation där systemet ska införas ansvarar för implementeringen med stöd från teknikutvecklingen. Implementeringsfasen avslutas med samfunktionsprovning som syftar till att visa att de i anläggningen installerade systemen, med organisation och kontrollsystem, uppfyller ställda krav och konstruktionsförutsättningar. Efter genomförd implementering ska systemet anses vara industrialiserat.

Under drift- och underhållsfasen behövs fortsatt utveckling. Detta drivs i första hand genom att ta tillvara erfarenheter från drift och underhåll och behovet av successiva förbättringar.

10.3 Behov av teknikutveckling

Teknikutvecklingen ska i tid leverera den industrialiserade teknik som behövs för att ta Kärnbränsleförvaret och Clink i drift. I de inlämnade ansökningarna för slutförvaring och inkapsling av använt kärnbränsle har SKB redovisat referensutformningar av barriärer för långsiktig säkerhet och en förvaringslayout som är tekniskt genomförbara och som ska kunna uppfylla gällande krav och verifieras mot dessa. Detaljkonstruktioner som är anpassade till en industrialiserad process och som uppfyller specifika krav på kvalitet, effektivitet och kostnader behöver fortfarande tas fram och implementeras. Förvarets layout måste anpassas till de detaljerade lokala bergförhållanden som påträffas när förvaret byggs.

10.3.1 Övergripande behov

På kort sikt har teknikutvecklingen som mål att säkerställa att den teknik, som behövs för att kunna påbörja uppförandet av Kärnbränsleförvaret och inkapslingsdelen av Clink, finns tillgänglig före byggstart. För Kärnbränsleförvaret gäller det i första hand undersökningsmetoder och teknik för byggande av förvarets tillfarter. Detta underlag behövs även för det dokument avseende hantering av frågor som rör kärnteknisk säkerhet före start av provdrift, det vill säga under uppförandet av tillfarter, centralområde och första deponeringsområdet, Suus (Säkerhet under uppförande av slutförvarsanläggningen) som SKB behöver ta fram som underlag före byggstart. Teknikutveckling behövs även för de system som ska finnas i förvarsområdet för att SKB ska kunna presentera och få ett godkännande av PSAR före byggstart. Utvecklingsbehoven kopplade till dessa kortsiktiga mål redovisades i Fud-program 2010 och ett större antal teknikutvecklingsprojekt har därefter initierats, vilket redovisas under nulägesbeskrivningarna i kapitel 11 till 15. De flesta av dessa teknikutvecklingsprojekt förväntas kunna avslutas under 2013 eller 2014.

Under den kommande Fud-perioden påbörjas de tidskritiska momenten av detaljkonstruktionen för system i inkapslingsdelen av Clink. Vidare påbörjas detaljkonstruktion av de tekniska system som behöver vara färdiga inför detaljprojektering av förvarsområdet i Kärnbränsleförvaret, produktionsbyggnad för bentonithantering och kapsel-fabrik. Denna utveckling bedöms ta flera år och behöver därför påbörjas i god tid innan detaljprojekteringen av de olika anläggningsdelarna kan påbörjas. Ytterligare uppgifter kan tillkomma som resultat av SSM:s granskning av ansökningarna enligt kärntekniklagen.

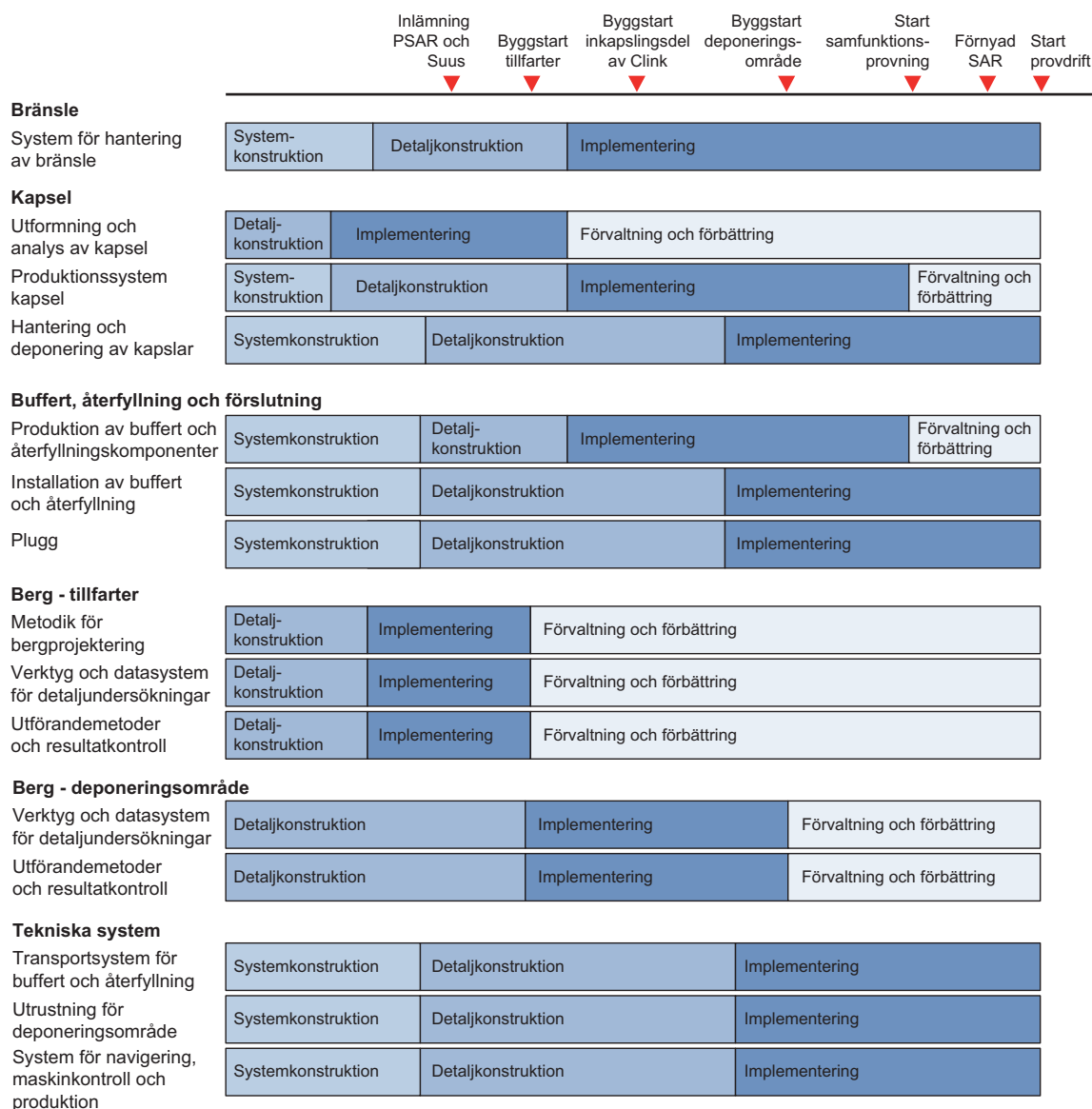
I följande avsnitt redovisas hur långt teknikutvecklingen måste ha kommit inför några av de viktigaste milstolparna i det återstående arbetet med att projektera och uppföra KBS-3-systemets anläggningar. Figur 10-1 ger en översikt. Noteras bör att flera av milstolparna ligger bortom den kommande Fud-perioden, men att vissa utvecklingsinsatser på grund av de i vissa fall långa utvecklingstiderna behöver påbörjas redan nu.

10.3.2 Återtag

Det finns i Sverige inga bestämmelser i lagar eller i andra författningar med krav på att exempelvis använt kärnbränsle som deponerats i ett slutförvar ska kunna återtas. Enligt SSM:s allmänna råd till föreskrifter om säkerhet vid slutförvaringen av kärnämne och kärnavfall (SSMFS 2008:21) kan åtgärder vidtas med främsta syfte att underlätta återtagande av deponerade kapslar. Sådana åtgärder får dock inte medföra att förvarets långsiktiga säkerhet försämras. Det kan finnas situationer där återtag före förslutning kan bli aktuellt.

SKB bedömer att det är möjligt att både före och efter förslutning återta kapslar från det planerade Kärnbränsleförvaret, men genomförandet blir mer arbetskrävande och sannolikt mer komplicerat efter förslutning. Inkapslingsdelen av Clink konstrueras så att det blir möjligt att återföra kapslar med bränsle för förnyad inkapsling.

Återtag planeras att kunna genomföras som en tänkbar åtgärd för att hantera eventuella fel som uppstår eller upptäcks under deponeringssekvensen. En mer detaljerad och specifik redovisning av detta kommer att tas fram under kommande Fud-period.



Figur 10-1. Översikt av hur långt teknikutvecklingen måste ha kommit inför några av de viktigaste milstolparna i det återstående arbetet med att projektera och uppföra KBS-3-systemets olika anläggningar. Notera att flera av de framtida milstolparna ligger utanför den kommande Fud-perioden, men visas här för att ge en helhetsbild av teknikutvecklingen.

10.3.3 Horisontell deponering

Tillsammans med Posiva studerar SKB om horisontell deponering (KBS-3H) kan utgöra ett alternativ till vertikal deponering. Pågående projektperiod löper fram till 2016 och därefter kommer en utvärdering att genomföras. Beslut och planering för fortsatt utveckling av KBS-3H sker efter den utvärderingen.

10.4 Milstolpar

I detta avsnitt redovisas viktiga milstolpar där leveranser från teknikutveckling behövs och vad som behöver vara uppnått till dessa milstolpar. Mer detaljer, liksom planer, redovisas i kapitel 11–15.

10.4.1 Underlag till PSAR inför byggstart

Bränsle

Inför upprättande av PSAR för Clink och Kärnbränsleförvaret måste följande vara klart:

- Dokumentation av bränsle. Under den kommande Fud-perioden kommer befintlig databas att utvärderas, uppdateringsbehov identifieras och krav fastställas.
- Databasen med beräknade källstyrkor och källtermer som redovisar radiologiska egenskaper för generella bränslen med olika utbränningar och avklingningstider uppdateras och kompletteras. Databasen ska införas i SKB:s inarbetade och kvalitetssäkrade verktyg för att garantera kvaliteten på datahantering och användartillgänglighet.
- Utvärdering av vald metod för att torka bränslet, Forced Gas Dehydration (FGD), ska vara genomförd.
- En fördjupad och breddad kriticitetsanalys ska vara genomförd med övergripande mål att kriticitetsanalys, inklusive utbränningskreditering och BA-kreditering (Brännbar Absorbator) kreditering (se avsnitt 11.9 Kriticitet), för alla SKB:s nuvarande och framtida anläggningar ska vara gjorda efter samma förutsättningar, med samma moderna beräkningsverktyg och med samma metodik.

Kapsel

Reviderade konstruktionsförutsättningar kommer att utgöra underlag för uppdatering av produktionsrapporten för kapseln. PSAR inför byggstart innebär att konstruktionsfasen i huvudsak ska vara slutförd, vilket medför att följande måste vara klart:

- Kapselns referensutformning ska vara verifierad mot konstruktionsförutsättningarna.
- Föreslagna tillverkningsmetoder ska visas kunna producera kapselkomponenter och kapslar enligt vald referensutformning.
- Provningsprocesser och kontroller ska vara tydliggjorda och visas kunna leda till att överensstämmelse med konstruktionsförutsättningarna kan kontrolleras.

Buffert, återfyllning och förslutning

Reviderade konstruktionsförutsättningar kommer att utgöra underlag för uppdatering av produktionsrapporterna för buffert, återfyllning och förslutning. I detta arbete ingår produkt- och processkartläggning för att avgöra vad som är viktigt för säkerheten samt att ta fram en preliminär kvalitetsplan som anger behov av kvalitetssäkringsåtgärder.

Systemkonstruktionen kommer att pågå fram till inlämnandet av PSAR.

Berg

I PSAR- och Suus-dokumenterna behövs beskrivningar av krav, metodik, utförande och resultatkontroll (verifiering) för allt bergarbete som utförs i slutförvarsanläggningen. För PSAR behöver även dessa beskrivningar finnas för bergarbeten i deponeringsområdet, val av deponeringstunnlar och deponeringshål samt hur resultaten av bergarbeten och urval ska verifieras mot konstruktionsförutsättningarna. Dessa beskrivningar behöver ge en tillräckligt tydlig bild av arbetet och slutresultatet, men utvecklingen av detaljer kan fortsätta fram till att detaljprojektering av deponeringsområdet startar.

Tekniska system

Inför PSAR behöver underlag lämnas från pågående utveckling av tekniska system för uppdatering av produktionsrapporter och framtagning av systembeskrivningar.

10.4.2 Start detaljprojektering av inkapslingsdel Clink och kapselfabrik

Start av detaljprojektering av inkapslingsdelen av Clink innebär att de ingående tekniska systemen väsentligen måste ha passerat detaljkonstruktionsfasen. Detta betyder att:

- Teknikutvecklingen för resteffektmätningar ska ha passerat konceptfas, systemkonstruktion och detaljkonstruktion.
- Den valda torkmetoden ska vara verifierad och validerad så att den klarar de krav som ställs på bränslet.
- Det av SKB initierade arbetet med att införa kärnämneskontroll i designen av inkapslingsdelen av Clink och slutförvarsanläggningen ska vara genomfört.

Vid start av detaljprojektering av kapselfabrik behöver teknik och metoder för produktion av kapslar vara utvecklade och fungera i industriell skala.

10.4.3 Inför byggstart av inkapslingsdel Clink och kapselfabrik

Inför byggstart av inkapslingsdel Clink och kapselfabrik ska de system som detaljkonstruerats enligt avsnitt 10.4.2, vara upphandlade och planer för installation och kvalificering fastställda och införda i planerna för uppförandet.

10.4.4 Underlag till detaljprojektering av tillfarter

Innan detaljprojekteringen av Kärnbränsleförvarets tillfarter kan starta, måste observationsmetoden (metodik för undermarksbyggande) vara implementerad samt detaljundersökningsprogram för ramp och schakt vara framtaget.

10.4.5 Passage av nivå under toppförslutning

Under nivån för toppförslutning av Kärnbränsleförvaret ställer konstruktionsförutsättningarna krav på förslutningens genomsläpplighet. Därför ställs också andra krav på bergarbete och sprängskadezon under toppförslutningen. Detta innebär att det ska vara verifierat att uttagsmetoder, kontrollprogram, metoder för bergförstärkning och injektering uppfyller den kravbild som gäller nivån under toppförslutning.

10.4.6 Underlag till detaljprojektering av produktionsbyggnad

Detaljkonstruktion av produktionen av buffert och återfyllning ska vara genomförd som underlag för detaljprojektering av produktionsbyggnad. Detta innebär att följande behöver vara genomfört:

- Kravspecifikationer på material behöver vara fastställda.
- Beslut om pressteknik för buffertblock ska vara fattat.
- Tillverkningsmetoder som fungerar i industriell skala för produktion av bentonitblock och bentonitpelletar för buffert och återfyllning ska vara fastställda.
- Provningsmetoder som fungerar i industriell skala ska vara fastställda.
- Förutsättningar för framtagning av ett system för kvalitetsstyrning och kontroll ska vara fastställda.

Den utrustning som behövs i produktionsbyggnaden utgörs nästan uteslutande av standardmaskiner. Ett visst utredningsarbete behöver ändå genomföras för att ta fram underlag till kravspecifikationer och val av utrustning. Detta görs inom produktionslinjerna för buffert och återfyllning.

10.4.7 Underlag till detaljprojektering av deponeringsområde

Installationsmetoder och metoder för provning och kontroll av buffert och återfyllning måste vara detaljkonstruerade och verifierade inför detaljprojektering av deponeringsområde. Vid utveckling av specialmaskiner behöver prototyper ha tagits fram och testats. För att verifiera att installation av buffert och återfyllning fungerar som avsett inom erforderliga tidsramar, behöver tester genomföras i full skala i förhållanden som råder under mark.

För bergrelaterade frågor måste följande vara klart:

- Verifiering av platsmodell/platsförståelse.
- Test att framtagna kriterier för val av deponeringshål fungerar.
- Deponeringshål borrar och tillverkning av avfasningen i Forsmarks berg testad.
- Uttagsmetoder inklusive förstärkning och injektering fastställda.
- Metod för tillverkning av plan sula under Forsmarksförhållanden bestämd.

10.4.8 Start samfunktionsprovning av KBS-3-systemet

Tekniska system som behövs i Clink ska vara inköpta, tillverkade, installerade, testade och kvalificerade inför samfunktionsprovningen av KBS-3-systemet. Innan samfunktionsprovning kan ske måste metoder och delprocesser för bergutbyggnad av Kärnbränsleförvaret vara framtagna och kvalificerade.

Deponeringssystemet ska vara driftsatt vid samfunktionsprovning, vilket medför att tekniska system för hantering och transport av kapsel, buffert och återfyllning ska vara tillverkade, installerade och testade. Systemen kommer att genomgå integrationstester för att säkerställa att utrustningar och tekniska system tillsammans fungerar som avsett före samfunktionsprovning. Kvalificeringar av processer med tillhörande utrustningar, personal och leverantörer ska vara genomförda och dokumenterade.

System för kvalitetsstyrning och kontroll av kapseltillverkning, produktion av buffert- och återfyllningskomponenter, hantering och installation av kapsel, buffert och återfyllning samt bergbyggnadsprocessen ska vara implementerat.

10.4.9 Underlag till förnyad SAR

Inför tillstånd för provdrift av Clink och Kärnbränsleförvaret måste en förnyad SAR lämnas in. Inför drifttillstånd tas en kompletterad SAR fram och lämnas in till SSM. I denna ska resultat och erfarenheter från implementeringsfasen, inklusive samfunktionsprovningen i respektive anläggning, redovisas. Detta innebär bland annat att produktionsrapporterna kommer att uppdateras med resultat från fullskaletester, genomförda kvalificeringar och samfunktionsprovningar.

11 Teknikutveckling bränslehantering

Detta kapitel behandlar den teknikutveckling som planeras för hanteringen av det använda kärnbränslet inför slutförvaring. Frågor som har betydelse för säkerheten efter förslutning av Kärnbränsleförvaret, till exempel bränsleupplösning, redovisas i kapitel 23 Bränsle.

11.1 Krav och förutsättningar

Det använda kärnbränslet utgörs huvudsakligen av bränsleelement från de tolv svenska kärnreaktorerna. Figur 11-1 visar bränsleelement från en BWR-reaktor respektive en PWR-reaktor. Utöver bränslet från de tolv reaktorerna ska en mindre mängd udda bränslen och bränslerester från den tidiga delen av det svenska kärnkraftsprogrammet, samt från forskning, slutförvaras. Det använda kärnbränslets egenskaper påverkar utformningen av Kärnbränsleförvaret.

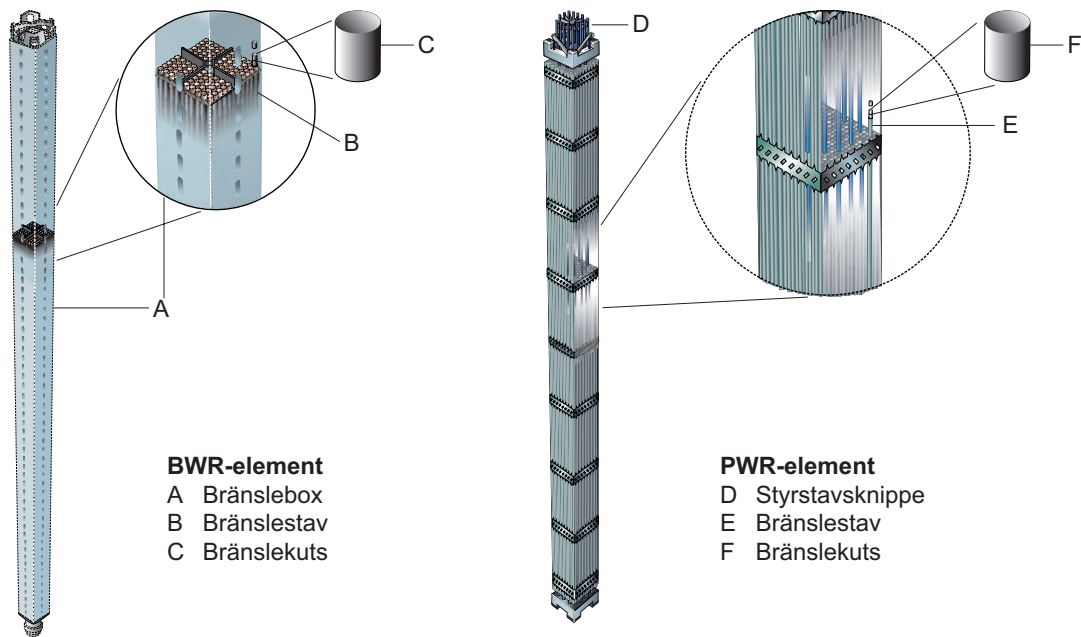
I Fud-program 2010 beskrevs hur SKB har fortsatt arbetet med att precisera konstruktionsförutsättningar för Kärnbränsleförvarets och Clinks utformningar under drift och säkerheten efter förslutning av förvaret. Resultatet av detta arbete avseende krav kopplat till bränslet presenterades i den så kallade bränslerapporten (SKB 2010d, kapitel 3) som ingår i ansökningarna för Kärnbränsleförvaret. De viktigaste av konstruktionsförutsättningarna med koppling till bränslet är:

- Bränslets resteffekt påverkar temperaturen i slutförvaret. Gällande krav är att temperaturen i bufferten inte får överskrida 100 °C. Därför ska de bränsleelement som innesluts i en kapsel väljas med hänsyn till sin utbränning och avklingningstid så att den sammanlagda resteffekten i hela kapseln ligger under en högsta acceptabel nivå. Denna nivå påverkas bland annat av kapselns, buffertens och bergets värmeledningsförmåga och är enligt referensutformningen 1 700 watt.
- Strålning på kapselns utsida kan leda till utvändig korrosion av kopparkapseln. Maximal tillåten stråldosrat på kapselytan är en gray per timme (Gy/h). För kombinationer av bränsleelement som kan accepteras för inkapsling med hänsyn till resteffektkravet ligger ytdosraten på en kapsel enligt referensutformningen med marginal under den acceptabla nivån. Vid hanteringen ska det verifieras att kapselns ytdosrat inte överskrider den acceptabla nivån.
- För att undvika korrosion av insatsen i kapseln behöver mängden vatten och vattenånga i kapseln begränsas och huvuddelen av den luft som finns i kapseln ersättas med en inert gas. Därför ska atmosfären i kapseln ersättas med argon (> 90 procent) och bränsleelementen torkas så att mängden vatten i kapseln inte överskrider 600 gram.
- Kriticitet får under inga omständigheter uppstå i kapseln. Därför ska bränsleelement som ska kapslas in väljas med hänsyn till anrikning, utbränning, geometrisk konfiguration och material i kapseln så att kriticitet inte uppstår under hantering och förvaring. Detta ska gälla även i det fall att kapseln, hypotetiskt, skulle fyllas med vatten.

Samtliga bränsleparametrar som påverkar hanteringen av det använda kärnbränslet och kan påverka Kärnbränsleförvarets säkerhet behöver vara kända och dokumenterade. Bränsleleverantörerna och reaktorägarna har därför utvecklat beräknings- och kontrollprogram för parametrarna. Programmen är kvalitetssäkrade och godkända för sitt ändamål av SSM.

Övergripande är att konstruktionsförutsättningarna som kopplar till bränslet revideras som en del av den översyn som beskrivs i avsnitt 10.2.1 Konstruktionsförutsättningar. Följande konstruktionsförutsättningar planeras att revideras:

- Kravet på mängden vatten i kapseln ses över och kopplas till om kvarvarande vatten skulle kunna försämra kapselns inneslutande förmåga.
- Bränslet indelas i bränsle och bränsle som kräver särskild hantering. Det vill säga att udda respektive skadat bränsle hanteras i en separat process där speciallösningar tas fram och analyseras.



Figur 11-1. Bränsleelement från en BWR-reaktor (vänster) respektive PWR-reaktor (höger).

11.2 Nuläge och program

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 redogjorde SKB för utvecklingsplaner avseende resteffekt och strålning, vatten och vattenånga, kriticitet samt kärnämneskontroll. I sin granskning av programmet framförde SSM bland annat följande:

- SSM bedömde att SKB har ett ändamålsenligt utvecklingsprogram avseende resteffekt och strålning och att presenterade resultat är trovärdiga. Myndigheten påpekade att redovisning av den bidragande gammastrålningsvärmens bör ingå i framtida underlag. Vidare konstaterades att de två mätmetoder som SKB använder ej är oberoende varandra. Överensstämmelsen mellan mätmetodernas resultat anses därför inte vara en validering av resultatet.
- SSM ansåg att SKB:s teknikutvecklingsplan avseende vatten och vattenånga bör förbättras samt att kriterium för torkningsprocessen ska fastställas. Myndigheten ansåg även att SKB inte redovisat data avseende skadat bränsle och därtill kopplade torkningsmekanismer.
- SSM ansåg att SKB:s program avseende mätningar av resteffekt på nya bränsletyper är bra. Vidare ansåg myndigheten att kriticitetsanalyserna bör kompletteras med avseende på konfiguration i kapsel samt avseende PWR-bränsle som är reaktivt. Allt bränsle som hanteras av SKB ska uppfylla kriticitetsvillkoren.
- Avseende kärnämneskontroll hade SSM ett flertal rekommendationer på förbättringar som bör genomföras.

Sammanställning av nuläge och program

SKB har sedan Fud-program 2010 lämnades in strävat efter att öka sammanhållningen av tekniska frågor som berör det använda kärnbränslet. SKB samlar löpande in kunskap om och utvecklar metodik och teknik avseende hantering av kärnbränslet.

Specifika delområden där utveckling som berör hanteringen av bränsle redovisas i avsnitt 11.3–11.11. Dessa delområden är:

- Bränsle som kräver särskild hantering.
- Dokumentation av bränsle.

- Källstyrkor och källtermer.
- Strålskydd och dosuppskattningar.
- Resteffekt.
- Vatten och vattenånga.
- Kriticitet.
- Bränsle och kapseloptimering.
- Kärnämneskontroll.

SKB:s program avseende hantering av bränsle omfattar flera delar, från krav på information om bränslets egenskaper innan de används i bränslecykeln till att utforma ett program för kärnämneskontroll som är internationellt godkänt. Under den kommande Fud-perioden kommer utvecklingsarbete att genomföras avseende resteffektsbestämning och kriticitetsverifieringar för samtliga anläggningar och transporter som ingår i KBS-3-systemet. Utveckling av kärnämneskontroll är ett område där SKB:s utveckling sker i nära samarbete med internationella organ.

SKB ska även hantera kärnbränsle tillverkat av uppberetat använt kärnbränsle, så kallat Mox-bränsle (Mixed oxide fuel). Detta bränsle kommer att beaktas för de olika delområdena.

11.3 Bränsle som kräver särskild hantering

Nuläge

SKB har beslutat att bränsle som kräver särskild hantering ska utredas och redovisas separat. Det omfattar bland annat skadat och udda bränsle och kommer att hanteras i en eller flera separata processer där speciallösningar tas fram och analyseras.

Program

Det finns många olika typer av bränsleskador som kräver särskilda metoder för att omhändertas i KBS-3-systemet. Man kan till exempel kapsla in de skadade stavarna individuellt eller tillsammans i ett stavmagasin. För att försäkra sig om att samtliga skadade bränslen kan omhändertas i KBS-3-systemet kommer en inventering av skadat bränsle samt en handlingsplan för omhändertagandet att tas fram under kommande Fud-period.

Det kommer att utredas vilka åtgärder i hanteringen av skadat bränsle som är lämpliga att utföra på kärnkraftverken, i Clink eller i någon annan anläggning.

11.4 Dokumentation av bränsle

Den databas som i dag används för att dokumentera inventariet av använt kärnbränsle heter Pluto. Pluto har vissa begränsningar gällande vilken information som kan lagras, användarvänlighet, sökmöjligheter och automatiserade kontroller. Den kommer därför antingen att behöva ersättas av en ny databas eller förbättras för att möta kraven inom nämnda områden. Under kommande Fud-period kommer Pluto att utvärderas, uppdateringsbehov identifieras och krav att fastställas.

11.5 Källstyrkor och källtermer

Nuläge

En företagsgemensam rapport med beräknade källstyrkor och källtermer har tagits fram som underlag för ansökningarna (SKBdoc 1179234). Denna rapport redovisar nukleära egenskaper för generella bränsletyper med olika utbränningar och avklingningstider. Data finns för bränsleelement från PWR och BWR samt BWR-Mox-bränsle.

Program

2013 kommer en första uppgradering av källstyrkor och källtermer att genomföras. Inom pågående projekt kommer ytterligare behov att identifieras och eventuella kompletteringar kommer att behandlas successivt. Rapporten där detta redovisas ska genomgå kvalitetssäkring och införas i SKB:s kvalitetssäkrade verktyg för att säkerställa kvaliteten på datahantering och användartillgänglighet.

11.6 Strålskydd och dosuppskattningar

Nuläge

KBS-3-metoden innebär att flera olika arbetsmoment ska utföras där det är av stor vikt att ha kännedom om dosrater från de enheter som hanteras. Detta gäller till exempel hantering av bränsleelement i Clink, transport av fyllda kapslar och kapselhantering i slutförvarsanläggningen. Sedan Fud-program 2010 har nukleära data för kärnbränsleelement respektive kapsel med använt kärnbränsle tagits fram och applicerats i analyser avseende strålskydd och dosuppskattningar. Dessa används bland annat i ansökningarna för slutförvarsanläggningens säkerhetsanalys för drift.

Program

Metoder och beräkningsprogram för att beräkna dosrater och dosbelastningar är internationellt validerade och verifierade och baseras bland annat på partikeltransportsberäkningar av Monte Carlo-typ. SKB avser att fortsätta använda dessa beräkningsmetoder och utveckla samt anpassa beräkningsmodellerna för SKB:s förutsättningar och applicera dem i ökad detaljeringsgrad i samband med att behoven uppstår. Detta gäller främst när teknikutvecklingen av anläggningarna går in i konstruktionsfasen.

11.7 Resteffekt

Nuläge

SKB har sedan mitten av 1990-talet följt utvecklingen av beräkningsprogram för resteffekt i använt kärnbränsle genom samarbeten med både Studsvik Scandpower och Oak Ridge National Laboratory. De beräkningsmetoder som finns i dag baseras på drifhistoriken från operatörerna av reaktorerna. För att kunna beräkna resteffekten behöver man därför försäkra sig om att deklarerade data stämmer. Det kan göras antingen genom att administrativt försäkra sig om kvaliteten på datahanteringen eller genom att göra verifierande mätningar av bränslet före inkapsling.

En mätutrustning för kalorimetriska mätningar av resteffekten i enskilda bränsleelement har varit i drift på Clab sedan 2003 och mätningar har utförts på över 200 BWR- och PWR-element (SKB 2006a). Resultaten av dessa mätningar används för att förstå bränslets egenskaper samt som underlag vid den utveckling av beräkningskoder som görs i samarbete med Oak Ridge National Laboratory (USNRC 2010a, b). Eftersom mätningarna är tidskrävande har även en alternativ metod, högupplöst gammasppektroskopi, tagits fram tillsammans med Uppsala universitet (SKB 2006a).

Program

SKB fortsätter under kommande Fud-period att genomföra kalorimetriska mätningar och delta i internationella samarbeten för att ytterligare utveckla dagens beräkningsmodeller. SKB fortsätter utvecklingen av metoden att via högupplöst gammasppektrometri bestämma resteffekt. Metoden kommer att utvecklas och kompletteras med neutronmätningar för att förbättra resultaten. Mätningarna kommer göras i ett samarbete med Uppsala universitet och Los Alamos National Laboratory.

11.8 Vatten och vattenånga

Nuläge

Under projekteringen av inkapslingsdelen av Clink har två metoder för torkning av bränsle utretts, vakuumtorkning respektive torkning med varmluft. Båda metoderna har bedömts uppfylla kraven avseende torkning av ej skadat bränsle. Beträffande skadat bränsle finns osäkerheter om effektiviteten i torkning avseende förmågan att driva ut vattnet genom så kallade ”pin holes” i bränslekapslingen. Vakuumtorkning är den referensmetod som redovisas i ansökan för Clink.

I slutet av 2009 startades ett arbete med syfte att finna en alternativ metod som kan effektivisera torkningen av bränsle. I början av 2010 genomfördes en marknadsinventering av metoder för torkning av använt kärnbränsle. De metoder och system som hittades vid marknadsundersökningen var varianter av vakuum- och varmluftstorkning samt ett system kallat Forced Gas Dehydration System (FGD). FGD är en metod framtagen av Holtec International och är en variant av metoden Forced Helium Dehydration (FHD), som är licensierad av Nuclear Regulatory Commission i USA.

Torkmetoderna vakuum- respektive varmluftstorkning har övervägts tidigare av SKB och svagheter är sedan länge kända. Erfarenheter om dessa metoders styrkor och svagheter liksom nyare erfarenheter från FGD leder till slutsatsen att den har fördelar gentemot de andra torkmetoderna. Detta gäller både för hur effektivt bränslet kan torkas och hur skonsam torkningen är för bränslet.

Program

SKB har valt att gå vidare med metoden FGD. Metoden är en tvåstegsprocess där första steget innebär att obundet vatten förångas, förflyttas och kondenseras ut. Därefter drivs bundet vatten ut ur till exempel skadat bränsle, vilken delvis kan liknas vid frystorkning. Av förstudien framgår att FGD är att föredra för bränsletorkningen då den har förmåga att driva ut vatten ur skadat bränsle även vid små skador. Fortsatt projektering ska utgå från att FGD används för bränsletorkning i inkapslingsdelen av Clink och att drivgasen är kvävgas.

Under nästa skede (system- och detaljkonstruktion) ska systemet för torkning anpassas ytterligare efter anläggningens förutsättningar (kylning av utrustning, omhändertagande av processvatten, omhändertagande av kvävgas, interface mot övriga system, anpassning för 60 års drift med mera). Systemet ska konstrueras utifrån gällande normer och standarder i Europa för att kunna CE-märkas.

En kvarstående fråga är att ta reda på hur stora skador som kan förväntas på det svenska kärnbränslet, det vill säga hur små hål som är relevant att beakta och testa att en torkmetod klarar att avlägsna bundet vatten från.

11.9 Kriticitet

Nuläge

I ansökningarna för Clink och Kärnbränsleförvaret har den minskning av reaktiviteten som sker då bränslet bestrålas i reaktorn och utbränningen ökar tillgodosåknats i kriticitetsanalyserna, så kallad utbränningskreditering. För Clab tillgodosåknas i dag inte utbränningskreditering för PWR, men för BWR tillämpas BA-kreditering. Detta innebär att hänsyn tas till att allt färskt BWR-bränsle innehåller ett reaktivitetssänkande ämne (främst gadolinium-155) som bränns ut under den första tiden i reaktorn, så kallad Brännbar Absorbator (BA).

Program

Den metod som SKB har använt för utbränningskreditering i ansökningarna för Kärnbränsleförvaret följer en metod som utvecklats av Oak Ridge National Laboratory. SKB avser att under kommande Fud-period implementera denna metodik avseende kriticitetsberäkningar för samtliga SKB:s anläggningar och transportsystemet.

SKB:s program avseende fördjupad och breddad kriticitetsanalys har som övergripande mål att kriticitetsanalyser för alla SKB:s nuvarande och framtida anläggningar ska vara gjorda efter samma

förutsättningar. Detta avser såväl metodik som beräkningsprogram och själva analysen, inklusive utbränningskreditering och BA-kreditering. Utvecklingen av metodiken och valideringen av beräkningsprogram ska vara i enlighet med moderna internationellt accepterade standarder och krav.

Dessutom ska SKB säkerställa att kompetens avseende kriticitetsfrågor finns. Mer detaljerat har programmet följande innehåll:

- Validera de beräkningsverktyg som SKB använder för kriticitetsanalys.
- Beskriva den metodik och de principer som SKB använder sig av för utbränningskreditering.
- Uppdatera kriticitetsanalysen för inkapslingsdelen av Clink.
- Uppdatera kriticitetsanalysen för Kärnbränsleförvaret.
- Säkra att den kompetens och de verktyg som behövs för att göra kriticitetsanalyser för Clab, Clink och Kärnbränsleförvaret finns tillgängliga inom Vattenfallkoncernen.
- Uppdatera kriticitetsanalyserna för Clab med moderna beräkningsverktyg och för de bränsletyper som i dag är mest reaktiva.

11.10 Bränsle- och kapseloptimering

Nuläge

När konstruktionsförutsättningar tagits fram för inkapslingsdelen av Clink och Kärnbränsleförvaret har behov av att optimera bränsle- och kapselhantering framkommit. Detta gäller vilka bränsleelement som ska placeras i respektive kapsel. En första optimering har genomförts och redovisats i bränslerapporten (SKB 2010d). Primärt mål för den optimeringen var kapselns totaleffekt och att minimera antalet kapslar som ska deponeras.

Program

Detaljeringsgraden i konstruktionsförutsättningarna har ökat och en förnyad och mer detaljerad optimering krävs. Bland annat bör antalet parametrar som inkluderas i optimeringen öka. Det finns därför ett behov att revidera och komplettera redovisningen av bränsle- och kapseloptimering.

Målet är att fylla positionerna för bränsleelement i kapslarna inför deponering, utan att hanteringen blir för komplex eller att ett orimligt antal lyft krävs. Krav på kriticitet och resteffekt ska alltid beaktas. Flera olika aspekter på KBS-3-systemet ska tas hänsyn till, till exempel:

- Optimering av kapselinnehåll.
- Hanteringen i Clink.
- Planarbetet (prognos om den framtida bränsleanvändningen och ekonomisk optimering).
- Kärnbränsleförvarets deponeringslayout.

11.11 Kärnämneskontroll

Nuläge

Kärnämneskontroll syftar till att myndigheter och kontrollorgan ska kunna förvissa sig om att kärnämne inte avleds. Med kärnämne avses här naturligt uran, uran utarmat av isotopen 235 eller klyvbara material som uran-233, uran 235, plutonium-239 och torium. SKB:s anläggningar ska uppfylla de krav som ställs på kärnämneskontroll från såväl svenska myndigheter som internationella kontrollorgan. Det innebär att det ska finnas ett administrativt system för redovisning av kärnämne och var det finns placerat, samt tekniska system för kontroll och bevakning av att det inte avleds.

För inkapslat använt kärnbränsle kommer systemet för kärnämneskontroll bland annat att innehålla uppgifter om de enskilda kapslarnas innehåll av kärnämne, vilka bränsleelement som kapslarna innehåller, när bränslet kapslades in, transporterades och anlände till Kärnbränsleförvaret, var kapslarna är deponerade och det totala innehållet av kärnämne i förvaret.

För nya kärntekniska anläggningar ska kontrollen av kärnämne beaktas redan i konstruktionskedet, så att tillsyn och kontroll underlättas. En viktig komponent i systemet för kontroll av kärnämne i Kärnbränsleförvaret är att kunna verifiera att anläggningen har byggts i enlighet med godkända ritningar. Detta görs för att kontrollorganen ska kunna förvissa sig om att det inte finns vägar ut från anläggningen, som inte har angivits och att det inte förekommer utrymmen där man bedriver annan verksamhet än den som angivits.

Program

Craven på kärnämneskontroll för de olika momenten i hantering av använt bränsle och förslutna kapslar är övergripande och omfattande. SKB arbetar brett med dessa frågor och tar in myndighetens rekommendationer. De övergripande craven kommer från IAEA som sätter ramarna. Europeiska kommissionen, Euratom, ställer också krav på kärnämneskontrollen enligt det fördrag som Sverige skrivit på. Detta innebär att det är viktigt att SKB:s utveckling av metoder och utrustning för hantering, verifiering och logistik sker i samarbete med IAEA och Euratom. Ett steg i detta samarbete är framtagningen av Draft BTC (Basic Technical Characteristics). De första versionerna av Draft BTC för Clink och för Kärnbränsleförvaret är inlämnade till Euratom för kommentarer. Uppdateringar och utveckling av draft BTC sker under lång tid framåt och fastställs först inför provdrift.

Metodik och verifiering av kärnämneskontroll planeras för kommande Fud-period och kommer att koordineras bland annat med det ovan nämnda resteffektsprojektet. Specifikt för respektive del av KBS-3-systemet avses programmet för kärnämneskontroll genomföra följande:

Inkapsling

Det använda bränslets innehåll av kärnämne beror på anrikning och utbränning och kan beräknas med samma program som övriga bränsleparametrar, som måste vara kända. Innehållet av kärnämne kan alltså bestämmas samtidigt som resteffekten med kalorimetriska metoder. För att verifiera det beräknade kärnämnesinnehållet kan det bli nödvändigt att göra mätningar av neutronstrålning och gammastrålning på varje bränsleelement. Dessa två oberoende metoder kan ge tillräckligt bra information om hur mycket kärnämne som varje bränsleelement innehåller (se även avsnitt 11.7).

För att säkerställa innehållet av kärnämne i varje kapsel, kommer bränslet efter att det genomgått verifierande mätningar i verifieringsposition i inkapslingsdelen av Clink att placeras så att det inte kan förväxlas. Efter hantering, torkning och placering av bränslet i kapseln, kontrolleras bränslets identitet och position med optisk utrustning. Kapselns identitet verifieras vid samma tillfälle, så att det inte ska kunna uppstå någon otydlighet om vilket kärnbränsle som placerats i respektive kapsel. Efter förslutning utgör kapseln den nya minsta enheten i hanteringen av kärnämnet. Detta moment, även kallat re-batching (satsbyte), är ytterst viktigt i hanteringen och det kommer att utredas hur hantering, kontroll, verifiering och redovisning ska ske för att undvika alla möjligheter till fel.

SKB har initierat ett arbete för att tillsammans med SSM, Euratom och IAEA införa kärnämneskontroll i utformningen av inkapslingsdelen av Clink. Två huvudområden med behov av teknikutveckling har identifierats, verifiering av bränslet och verifiering av kapseln. SKB har beslutat att genomföra mätningar av resteffekt och bränsleverifiering. Ett samarbete mellan Euratom, US Department of Energy och SKB har inletts för att utreda huruvida en gemensam mätning för verifiering av bränsle kan genomföras. Det finns behov av liknande utredningar för kapselverifiering och arbete pågår internationellt inom detta område.

Transport

Kapseln placeras i en kapseltransportbehållare inför transport till Kärnbränsleförvaret. Kapseltransportbehållaren kommer att förses med sigill och annan utrustning för att säkerställa att kapseln som tas emot i slutförvaret är opåverkad och att inget kärnämne är avlett.

Slutförvar

I slutförvaret kontrolleras sigill. I slutförvarets mottagningsstation verifieras att kapselidentiteten är överensstämmande med avsänd kapselidentitet i samband med omlastning till deponeringsmaskinen. Slutförvarets olika öppningar är övervakade så att inget kärnämne ska kunna avledas.

12 Teknikutveckling kapsel

Sedan Fud-program 2010 har SKB lämnat in ansökningar för KBS-3-systemet. Kapselns referensutformning beskrivs i produktionsrapporten för kapseln (SKB 2010e). I arbetet med produktionsrapporten identifierades behov av fortsatt teknikutveckling och tester vilket beskrevs i Fud-program 2010. Detta arbete pågår och kommer i huvudsak att färdigställas och rapporteras under 2014.

Enligt referensutformningen består kapseln av en cylindrisk behållare med ett kopparhölje och en lastbärande insats av segjärn. I insatsen har kanaler av konstruktionsstål gjutits in för att ge plats åt det använda kärnbränslet. Två olika utformningar av insatsen har utvecklats, där kanalernas storlek och antal är anpassade efter bränsleelement från tryckvatten- respektive kokvattenreaktorer (PWR- respektive BWR-insatser).

Referensmetoder för tillverkning av komponenter samt svetsning av lock och botten har valts för att uppfylla referensutformningens designparametrar med reproducerbarhet och möjlighet till industrialisering. Kopparrören tillverkas med extrusion, lock och botten smids och insatsen gjuts. Svetsningen av kopparbotten och förslutning görs med friktionsomrörningssvetsning (Friction Stir Welding, FSW). Utvecklingen av friktionsomrörningssvetsningen har lett till en stabil och automatiserad process.

Utvecklingen av kapseln är inne i konstruktionsfasen. Tillsammans med Posiva planerar SKB arbete som syftar till att vidareutveckla:

- Referensutformningen.
- Dornpressning av kopparrör som alternativ referensmetod.
- Tillverkningsprocessen hos leverantör av segjärnsinsatser.
- Teknik för tillverkning av kopparlock och -botten.

Kapitlet beskriver teknikutvecklingen av kapseln avseende dimensionering, tillverkning, förslutning, kontroll samt deponering.

12.1 Krav och förutsättningar

I Fud-program 2010 konstaterades att arbetet med att precisera konstruktionsförutsättningar för kapseln hade fortsatt. Resultatet av detta arbete presenterades i produktionsrapporten för kapseln (SKB 2010e, kapitel 2) som ingår i ansökningarna för Kärnbränsleförvaret. De viktigaste av de där redovisade och nu gällande konstruktionsförutsättningarna för kapseln är följande:

- Kapseln ska motstå en isostatisk belastning på 45 megapascal, vilket är summan av maximalt svälltryck från bufferten och maximalt grundvattentryck.
- Kopparhöljet ska vara intakt efter en fem centimeter stor skjuvrörelse som har en hastighet på en meter per sekund. Detta gäller för en buffert med materialegenskaper hos en kalciumbentonit med densiteten 2 050 kilo per kubikmeter (kg/m^3), för alla positioner och vinklar hos skjavsprickan och för temperaturer ner till 0 °C. Insatsen ska ha kvar sina lastbärande egenskaper med avseende på isostatisk last.
- Kopparkapseln ska ha en nominell tjocklek på fem centimeter, även vid svetsfogarna.
- Det använda bränslets egenskaper, den geometriska utformningen samt materialsammansättningen i kapseln ska vara sådana att kriticitet undviks om vatten skulle tränga in i en kapsel.
- Konstruktionsförutsättningen att kapseln ska motstå isostatisk last omfattar även asymmetriska laster till följd av ojämn svällning av bentoniten. Tillfälliga asymmetriska laster kan uppkomma under vattenmättnadsfasen på grund av ojämn mättnad av bufferten eller oregelbundenheter i deponeringshålet. Oregelbundenheter i deponeringshålet kan även ge upphov till permanenta asymmetriska laster.

Det finns även vissa mer indirekta krav på kapselmaterialens sammansättning och struktur samt på miljön i den förslutna kapseln. Dessa sammanfattas enligt följande:

- Det finns indikationer på att gammastrålning skulle kunna orsaka försprödning i segjärnsinsatsen om kopparhalten i insatsen överstiger 0,05 procent.
- Kopparmaterialet i höljet är verifierat för
 - krypduktilitet: kornstorlek < 800 mikrometer, fosforinnehåll 30–100 ppm, svavelinnehåll < 12 ppm,
 - sprödhet: väteinnehåll < 0,6 ppm.
- Ett syreinnehåll på några tiotals ppm kan vara tillåtet i kopparn i höljet.
- Mängden salpetersyra som kan bildas i insatsen ska begränsas genom att atmosfären i insatsen byts ut så att argonhalten blir > 90 procent. Den tillåtna vattenmängden i insatsen är fastställd till 600 gram.
- Materialsammansättningen för segjärnet i insatsen ska vara: järn > 90 procent, kol < 6 procent och kisel < 4 procent.
- För att möjliggöra ultraljudsprovning av kopparkomponenter ska medelkornstorleken i materialet vara < 360 mikrometer.

Därutöver finns krav relaterade till produktion och drift. Allmänt formulerat ska tillverkning och installation av kapseln baseras på väl beprövad eller testad teknik. Kapslar med specificerade egenskaper ska vara möjliga att producera och installera med hög tillförlitlighet.

Konstruktionsförutsättningarna för kapseln kommer att revideras som en del av den översyn som beskrivs i avsnitt 10.2.1 Konstruktionsförutsättningar. Följande konstruktionsförutsättningar planeras att revideras:

- Tillåtna mängder inkapslade gaser och vätskor bland annat med hänsyn till risk för övertryck och korrosion i kapseln.
- Formulering och motivering av kravet på vilken isostatisk belastning kapseln ska tåla med hänsyn till framtida islaster.
- Formuleringen av hur kraven för skjuvbelastning på kapseln ska kunna verifieras så att hänsyn tas till osäkerheter och rumslig variation av bland annat defekter i insatsen och inhomogen fördelning av buffertens densitet.
- En tydligare beskrivning av kravet på dimensioner för kopparhöljet med hänsyn till korrosionsskydd som medger toleranser vid tillverkningen.
- Maximalt tillåtna temperaturer i kapselmaterialen under hantering med hänsyn till inverkan på materialegenskaperna.
- Tillåtet syreinnehåll i kopparn.
- Acceptabla ytdefekter på kapselns kopparhölje.

I inget fall innebär detta att slutsatserna i säkerhetsanalysen SR-Site (SKB 2011e) behöver revideras på annat sätt än att det ska bli än mer tydligt hur uppfyllandet av konstruktionsförutsättningarna kan verifieras.

12.2 Nuläge och program

Tabell 12-1 sammanfattar myndigheternas kommentarer på det utvecklingsprogram för kapseln som SKB redovisade i Fud-program 2010 samt aktuellt läge och program för kommande period. Mer detaljer om nuläge och program avseende teknikutveckling för kapseln redovisas i avsnitten 12.3–12.7.

Tabell 12-1. Sammanfattning av myndigheternas kommentarer på redovisningen av teknikutveckling av kapseln i Fud-program 2010, SKB:s nuläge samt SKB:s program.

Myndigheternas kommentarer på Fud-program 2010	SKB:s nuläge	SKB:s program
Kapselutformning – analys av kapseln		
Seghet och plastiska egenskaper hos segjärn behöver verifieras.	Nya försök har påvisat stabil spricktillväxt över 2,5 mm.	Fortsatt verifiering av segjärns plastiska egenskaper.
Analys av ojämnt svälltryck hos bufferten och påverkan på kapseln vid skjuvning.	Lastfallet identifierat men ej analyserat.	Analys initierad.
Samband mellan skjuvningens storlek och risk för skadad kapsel.	Probabilistiska beräkningar genomförda.	Utvärdering och rapportering av beräkningar.
Analys av skjuvning nära kapselns topp och botten.	Simuleringar utförda.	Analys av effekter pågår och rapporteras i december 2013.
Treaxlighetens betydelse för duktiliteten.	Provning genomförd.	Utvärdering av genomförd provning pågår.
Strålningens påverkan på brottsegheten.	Provning planerad.	Genomföra och utvärdera provning på provstavnivå.
Vissa krav på kapselns mekaniska egenskaper saknas.	Känslighetsanalyser för BWR-insatser utförda för skjuvlastfallet vilket gett underlag för att sätta krav på mekaniska egenskaper.	Ytterligare beräkningar planerade.
Egenspänningar i insatsen.	Samarbete med Posiva. Spänningar i nivån 30–60 MPa detekterade.	Ytmätningar samt mätning av inre spänningsfördelning för BWR-insatser är genomförd. Mätningar för PWR-insatser pågår.
Tillverkning av insatser		
Ytterligare karakterisering av insatsens mekaniska egenskaper.	Program för karakterisering av stabil spricktillväxt, treaxlighet samt brottseghet pågår.	Utvärdering och fortsatt karakterisering.
Oförstörande provning (OFP) av insatser		
Fortsatt utveckling av teknik för oförstörande provning för karakterisering av defekter.	Ultraljudsteknik har vidareutvecklats och testats i full skala på tillverkade insatser.	Utveckling av teknik för ytprovning. Fortsatt arbete med utveckling av teknik för ultraljudsprovning av insatsen, inklusive metodik för karakterisering och storleksbestämning av defekter.
Verifiering av provningssystemet med hjälp av demonstrationer på testblock.	Inledande försök med gjutning av testblock pågår.	Vidareutveckling av teknik för tillverkning av relevanta defekter i testblock.
Tillverkning av kopparkomponenter		
Orsak till stråk med förhöjd kornstorlek.	Studie genomförd där ett antal påverkansfaktorer identifierades.	Fastställande av tilläggskrav på koppar avseende ljuddämpning.
Oförstörande provning av kopparkomponenter		
Förklara sambandet mellan förhöjd ljuddämpning, medelkornsstorlek och minsta detekterbara defekt vid oförstörande provning.	Undersökningar av detekteringsförmågan vid ultraljudsprovning av kopparrör med olika materialstruktur och olika ultraljudsdämpning pågår.	Preliminära POD-kurvor (Probability of detection) kommer att beräknas för ultraljudsprovning av koppar med olika dämpning. Sambandet mellan materialstruktur och ultraljudsdämpning kommer även att studeras.
Förslutningssvetsning		
Utsträckning av foglinjeböjning i radiell led.	Experimentell studie med variation av tapplängd och rotationsriktning.	Fortsättning av programmet för ökad förståelse och minimering av fenomenet.
Svetsdefekters inverkan på mekaniska egenskaper.	Undersökning av defekter och dess inverkan på krypduktiliteten. Inverkan av defekter på kapselns mekaniska integritet är liten.	Program för att minimera förekomsten av svetsdefekter.
Oförstörande provning (OFP) av förslutningssvetsar		
	Vidareutvecklad teknik för ultraljudsprovning och radiografering samt implementerat en preliminär virvelströmsteknik för provning av svetsytan.	Utarbeta koncept för hur de provningstekniker som utvecklats kan implementeras i inkapslingsdelen av Clink.
Hantering och deponering av kapslar		
Utreda möjligheten till automatisk detektering av ytskador på kapslarnas kopparhölje före deponering.	Förstudie genomförd med laserskanning. Positivt resultat.	Fastställa minsta tillåtna defekt samt specificera system för skanning av ytan.

12.3 Kapselutformning – analyser av kapseln

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SSM ansåg i granskningen av Fud-program 2010 att det fanns farhågor gällande seghet och plastiska egenskaper hos segjärnsinsatsen. Myndigheten önskade också en verifiering av treaxlighetens betydelse för duktiliteten under en kombinerad skjuvlast och glaciation. Dessutom bedömdes att lastfallets böjning orsakat av ojämnt svälltryck, behövde analyseras för att bestämma tillåten defektstorlek.

SSM ansåg att brottsegheten borde verifieras för strålningspåverkat material. Även skjuvning av kapseln i ett plan nära lock och botten borde analyseras för att säkerställa kopparkapselns integritet. Myndigheten ansåg även att restspänningarnas betydelse för skadetåligheten behöver utredas eftersom mätningar indikerat kompressiva spänningar i nivån 100 megapascal nära insatsens yta.

SSM påpekade också (i anslutning till beskrivningen av långsiktig säkerhet) att det fortfarande saknas vissa återstående krav på kapselns materialegenskaper samt geometriska toleranser som har betydelse för tillverkningen. Hanteringslaster har i viss utsträckning analyserats (bland annat lyft i locket) men de ingår inte explicit i konstruktionsförutsättningarna. SSM ansåg vidare att det vid kommande FEM-analyser (Finita elementmetoden) är viktigt att beskriva hela den tänkta lasthistorien för kapseln, med tanke på att kallbearbetad koppar har lägre krypduktilitet jämfört med icke tidigare plastiskt deformerat kopparmaterial. SKB:s redovisade beräkningsresultat där både primär- och sekundärkryp modelleras visar även att inverkan av toleranskedjor mellan kapselns olika delar bör analyseras vidare.

Nuläge och program

SKB:s arbete med analyser av kapseln beskrevs sammanfattande i produktionsrapporten för kapseln (SKB 2010e) och i de underliggande rapporterna: designanalysen (Raiko et al. 2010), FEM-beräkningar (Hernelind 2010) samt skadetålighetsberäkningar (Dillström och Bolinder 2010). Den bentonitmodell som användes i FEM-beräkningarna baseras på laborieförsök (Börgesson et al. 2010, Dueck et al. 2010) och har verifierats mot ett äldre skjuvförsök (Börgesson och Hernelind 2010).

Ett flertal olika analyser och utredningar för insatsen pågår eller planeras. Dessa kommer att utgöra underlag till den uppdaterade designanalysen som redovisas i PSAR för Kärnbränsleförvaret. De viktigaste områdena är följande:

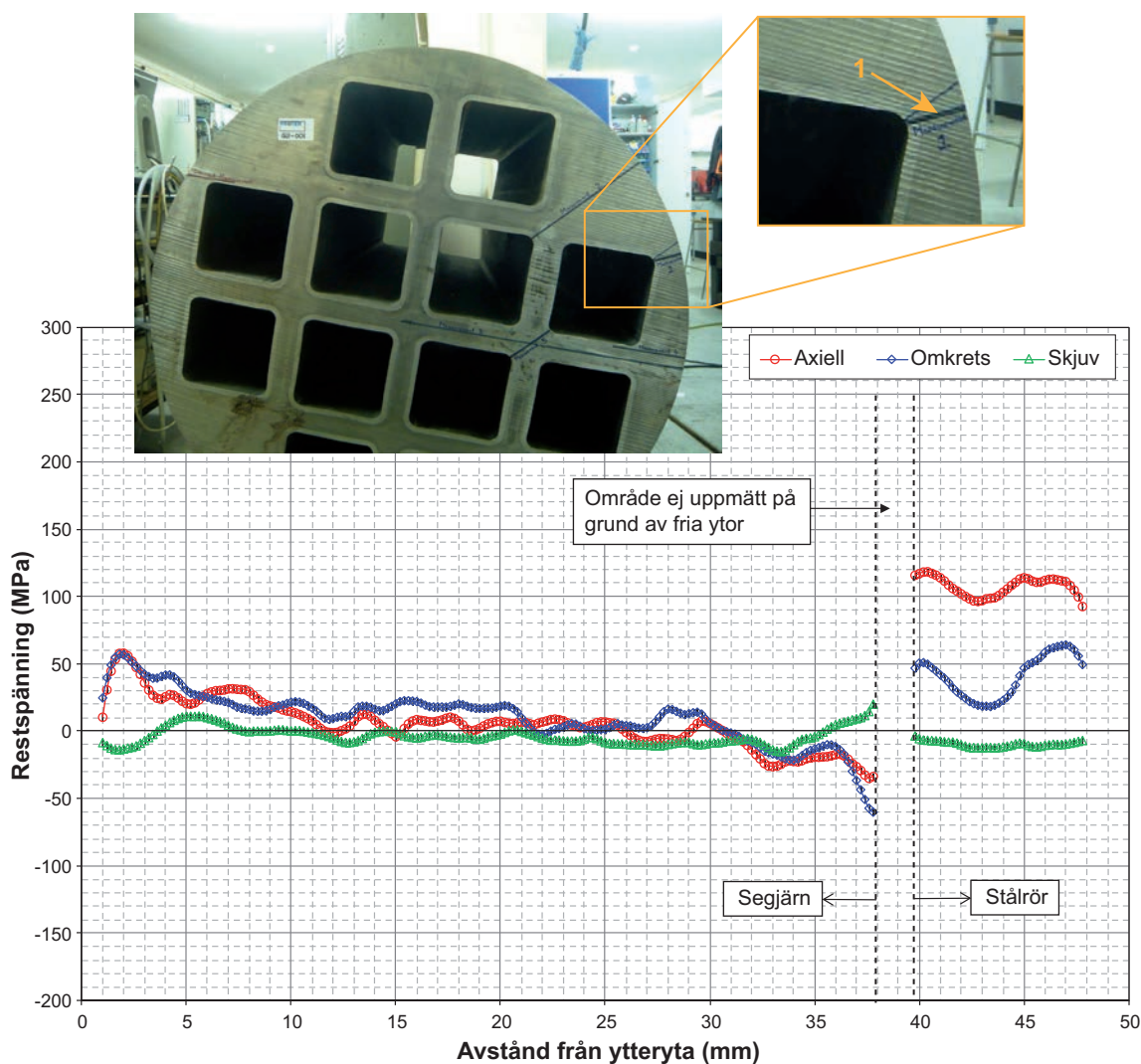
- Deterministiska beräkningar för kapsel med BWR- respektive PWR-insats har gett kritiska defektstorlekar i insatsen. Resultaten visar att acceptabelt defektdjup för en semi-elliptisk ytdefekt är 4,5 millimeter för BWR-insatsen. För PWR-insatsen har acceptabel defektstorlek samma storleksordning som för BWR-insatsen. Fortsatta beräkningar ska utföras för PWR-insatsen med materialdata som erhållits vid senare gjutning av tre PWR-insatser. Analyserna tillsammans med fraktografiska studier har visat att störst risk för insatsen är spricktillväxt vid skjuvbelastning då omgivande bentonit har hög densitet. Sprickorna kan initieras från inneslutningar i materialet om deras storlek och riktning är ogynnsam.
- SKB har genomfört provning av PWR- och BWR-insatser tillverkade med en vidareutvecklad gjutprocess som visar att materialets motståndskraft mot spricktillväxt bibehålls till minst 2,5 millimeters spricklängd. Genomförd provning visar att det blir skillnader i resultat mellan provning på olika laborier och undersökning av orsaken till dessa skillnader pågår.
- För att bedöma om treaxliga kompressiva laster påverkar materialets duktilitet har SKB genomfört en experimentell studie. Provtavlar med midja för att erhålla plan deformation provades tillsammans med provtavlar för ren skjuvning. Utvärdering av provresultaten pågår.
- Olika belastningsfall på kapseln orsakad av ojämn svällning av den omgivande bentonitbufferten kommer att utredas under kommande period.
- Arbete för att undersöka effekten av strålningspåverkan på brottseghet på segjärn pågår, se avsnitt 24.2.6 Strålpåverkan.
- För att öka kunskapen kring restspänningar i BWR-insatser har kompletterande provning av insatsens inre delar genomförts tillsammans med Posiva. Hålbörningsmetoden har använts och restspänningar i storleksordningen 30–60 megapascal har hittats. Ett exempel på resultat visas i figur 12-1. Effekten av dessa spänningar bedöms inte ha någon betydelse för kapselns integritet.

- Probabilistiska beräkningar för BWR-insatser har genomförts för skjuvlastfallet vilka tillsammans med deterministiska beräkningar kommer att utgöra underlag för att fastställa kraven för insatsens mekaniska egenskaper. Arbete med utvärdering av resultaten och rapportering pågår.
- Tidigare genomförda FEM-simuleringar för de olika belastningsfallen av insatsen är genomförda utan kontaktvillkor mellan insatsens kassett och omgivande segjärn. Känslighetsanalyser kommer att genomföras för att verifiera att denna förenkling är rimlig.
- Förbättrade mekaniska beräkningar för stållocket kommer att genomföras. I beräkningarna kommer hänsyn att tas till ventilen där inert gas förs in, infästningen av stållocket mot insatsen med bultförband samt packningen mellan insats och lock. Indata till beräkningarna kommer att baseras på verkliga spännings- och töjningskurvor för stållockets material.

För kopparhöljet pågår arbete med beräkningar av effekten av töjningar (plastiska töjningar och kryptöjningar) för olika förhållanden i Kärnbränsleförvaret. Analyserna har framför allt genomförts för svetsområdet och görs med FEM-baserade beräkningar.

För kopparhöljet bedrivs forskning om krypegenskaperna, se avsnitt 24.2.3 Deformation av koppar-kapsel vid yttre övertryck, vilken omfattar såväl provning som modellering.

Krypprovning av provstavar med tre olika typdefekter pågår. Defekterna som är cylindriska, koniska respektive sfäriska bedöms vara representativa för till exempel defekter som uppkommer vid hantering av kapslarna då ett lyftverktyg greppar i kopparlocket. Resultaten kommer att användas för att beskriva storleken på tillåtna ytdefekter som kan uppkomma vid hantering.



Figur 12-1. Resultat från restspänningsmätningar längs linje markerad med 1 i fotot ovan.

12.4 Tillverkning och provning av insatser

12.4.1 Tillverkning av insatser

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SSM ansåg i sin granskning av Fud-program 2010 att ytterligare insatser behöver gjutas, gärna vid flera gjuterier, för att öka tillförlitligheten i materialegenskaper.

Nuläge

Arbetet med tillverkning av insatser har inriktats på att få de mekaniska egenskaperna i hela insatsen att motsvara ställda krav med marginal.

Områden med poransamlingar har tidigare upptäckts vid gjutning av insatser. Analyser av material från dessa områden indikerar att orsaken är relaterad till förekomst av fukt. Utvecklingsinsatser i tillverkningsprocessen för att förhindra fukt har medfört att fenomenet inte observerats vid senare gjutningar.

Tillverkningen av PWR-insatser har varit i fokus sedan Fud-program 2010 eftersom tillverkningen av BWR-insatser anses vara färdigutvecklad. Simuleringar av gjutförloppet har genomförts. SKB har använt två gjuterier, ett som använder fallgjutning och sandform och ett som använder stiggjutning och kokill. Båda metoderna bedöms vara användbara i framtiden. Vid utvärdering av tillverkade insatser har det visat sig att gjuteriet som använder fallgjutning och sandform har tillverkat insatser med betydligt bättre materialegenskaper till följd av bättre processmetallurgi. Efter denna utvärdering har tre insatser gjutits vid detta gjuteri och utvärderingen av resultaten pågår. Fler insatser kommer att gjutas under 2013. Fallgjutning och sandform är den process som använts vid utvecklingen av gjutning av BWR-insatser.

Utveckling av tillverkningsprocesser vid två gjuterier kommer att behövas för att säkerställa en stabil framtida försörjning av insatser. Detta arbete kommer att göras närmare driftstart av Kärnbränsleförvaret. Posiva bedriver motsvarande utveckling av insatsen i ett finländskt gjuteri, ett arbete som SKB följer.

Kanalrören i insatserna har tidigare haft en tendens att tryckas in i nedre delen av insatsen på grund av högt tryck och hög temperatur under gjutningen. Detta fenomen undviks numera genom att kanalrören fylls med effektivt kompakterad sand innan gjutningen påbörjas och genom en mindre modifiering av PWR-kassetternas utformning.

Program

Den fortsatta utvecklingen kommer att inriktas på att öka förståelsen för gjutparametrar och materialets mikrostruktur samt kopplingen till mekaniska egenskaper såsom brottseghet.

Pågående arbete med att uppdatera och verifiera gjutprocessen kommer att slutföras. I arbetet ingår utvärdering av redan gjutna PWR-insatser, gjutning av ytterligare insatser samt fortsatt utvärdering och dokumentation.

12.4.2 Provning av insatser

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

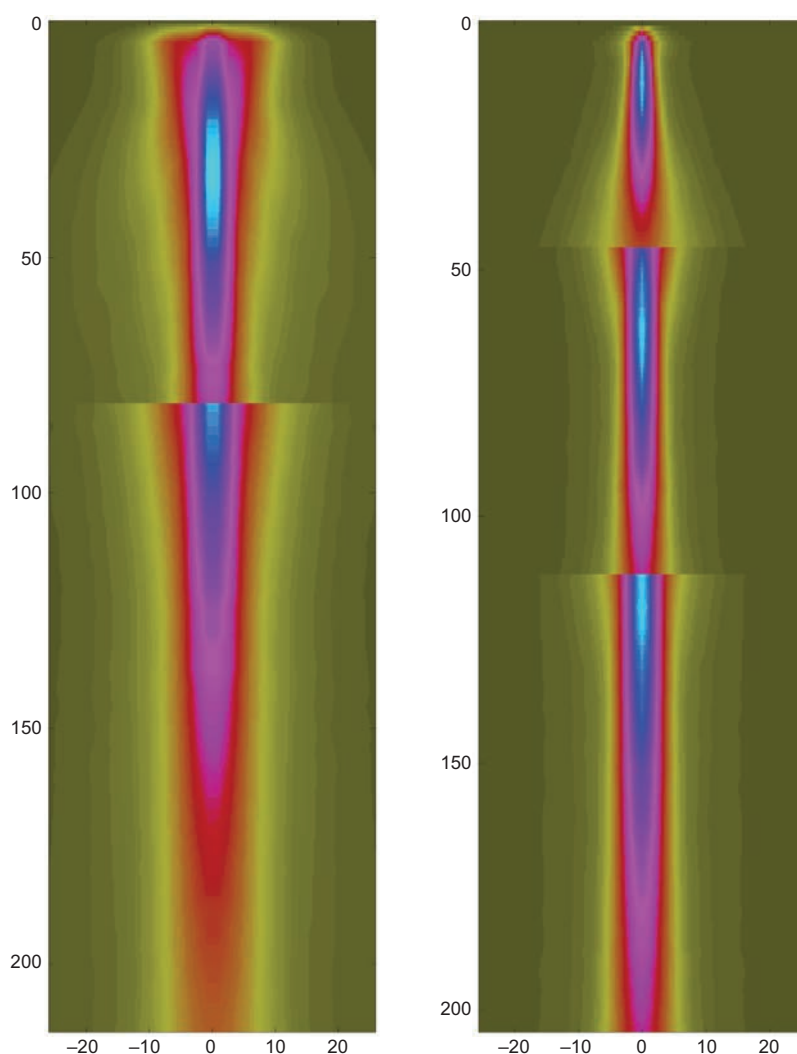
SSM påpekade i sin granskning av Fud-program 2010 att SKB bör arbeta vidare med teknik för oförstörande provning för karakterisering av defekter. Dessutom påpekades att verifiering av provningssystemet behöver ske genom praktiska demonstrationer på testblock med verklighetstroga defekter. Därför behöver teknik för defektframställning också utvecklas.

Nuläge

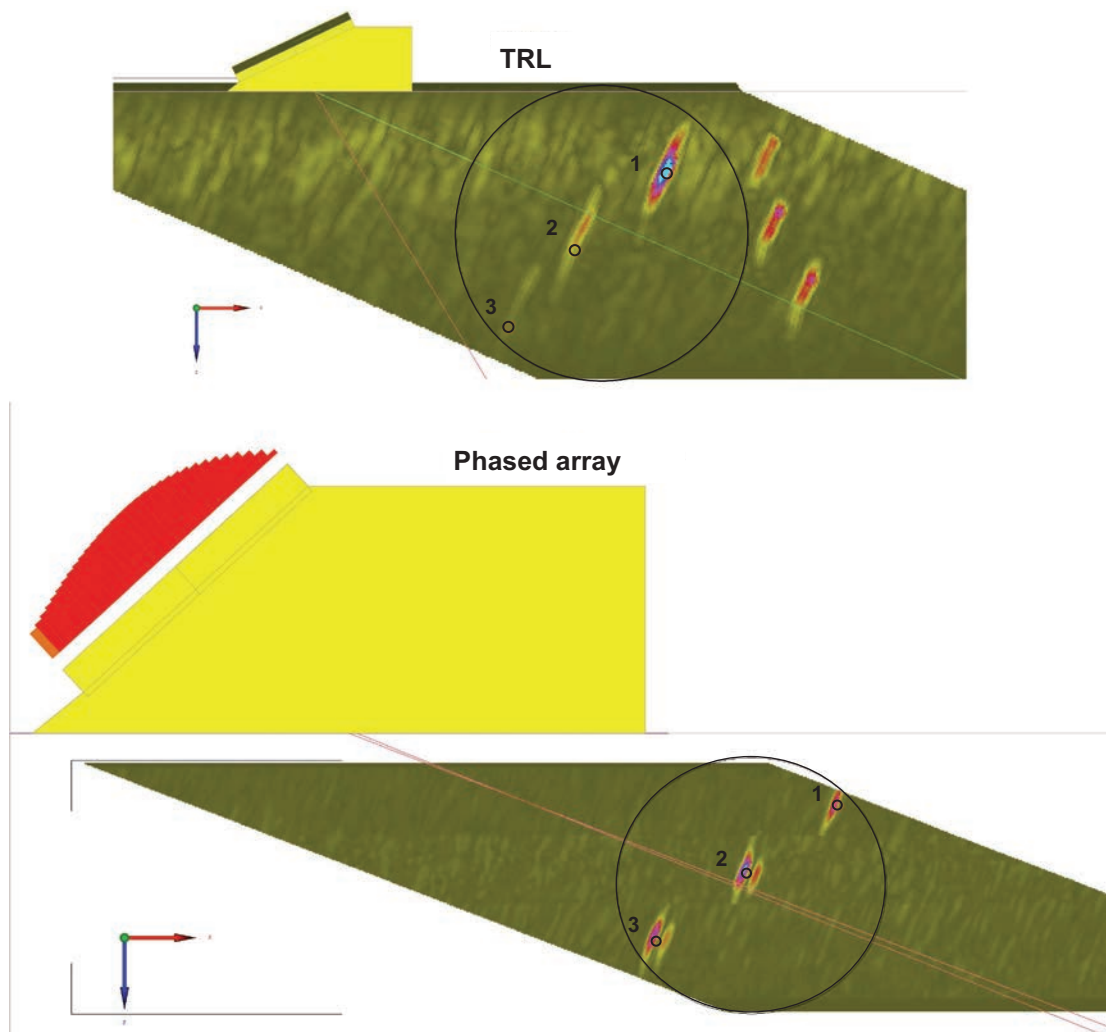
I Fud-program 2010 redovisades två tekniker för ultraljudsprovning, en baserad på phased array-teknik med 0° provningsvinkel och en baserad på TRL-teknik (Transmitter Receiver Longitudinal) med 70° provningsvinkel. Dessa tekniker har vidareutvecklats och kompletterande tekniker har utvecklats.

Phased array-tekniken, som används för provning av området från insatsens mantelyta ner till 200 millimeters djup har vidareutvecklats med ett array med högre frekvens (3,5 MHz). Dessutom har ljudets fokusering optimerats och därmed har en högre känslighet för detektering av defekter erhållits längs hela inspektionsdjupet. Detta illustreras med ljudfältssimuleringar med modelleringsmjukvaran Civa i figur 12-2.

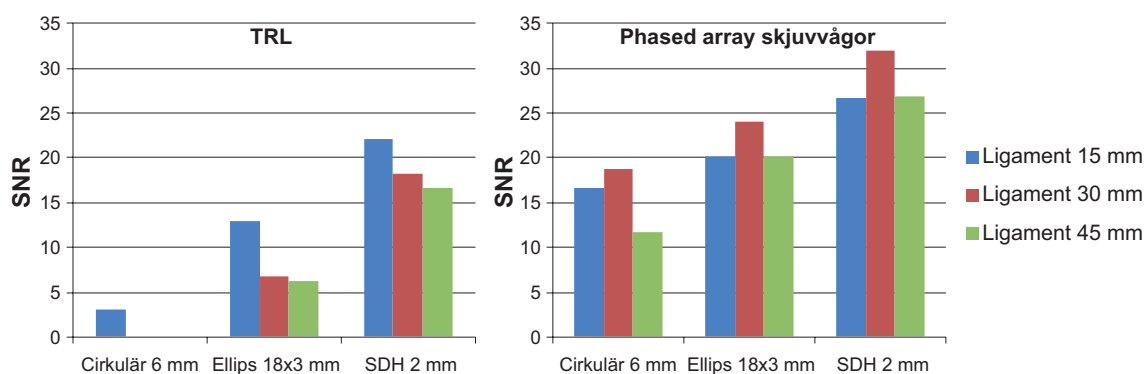
Data från TRL-tekniken är komplicerad att utvärdera bland annat på grund av att flera vågtyper reflekteras från kanalrörens väggar. Därför initierades en grundläggande studie för att utreda om provningen i stället kan göras med skjuvvågor. Initialt modellerades TRL-tekniken i modelleringsmjukvaran Civa och därefter modellerades ett flertal olika typer av ultraljudsgivare. Utifrån modelleringsresultaten designades linjärarrayer anpassade till insatsens radie med mekanisk fokusering i passiv riktning. En jämförelse av modelleringsresultat från TRL- och phased array-teknik presenteras i figurerna 12-3 och 12-4. Med utgångspunkt från den ovan beskrivna modelleringen har provningstekniken utvecklats för kompletterande provning av området från mantelytan ner till 50 millimeters djup. Arbetet har omfattat flera delar: tillverkning av linjärarrayer som nominellt genererar skjuvvågor med 70° infallsvinkel, utveckling av fixturen som håller givarna (se figur 12-5), definiering av fokusdjup samt framtagande av ultraljudsställningar och provningsinstruktioner.



Figur 12-2. Resultat från ultraljudsmodellering i Civa. Figurerna visar, med en färgkodad signalamplitud, ljudfältens bredd i millimeter i arraygivarens aktiva riktning (x-axeln) som funktion av inspektionsdjupet 0–200 millimeter (y-axeln). Den vänstra figuren visar ursprunglig phased array-teknik (2 MHz) medan den högra figuren visar optimerad teknik (3,5 MHz). Den optimerade tekniken som är indelad i tre fokusdjup resulterar i ett smalare ljudfält med jämnare amplitud längs hela inspektionsdjupet jämfört med den ursprungliga tekniken som endast är indelad i två fokusdjup.



Figur 12-3. Resultat från ultraljudsmodellering i Civa av provning av sidoborrade hål på olika djup (markerade 1, 2 och 3). Övre bilden visar resultat med TRL-givaren medan den undre bilden visar resultat med den nydesignade arraygivaren. Modelleringarna visar tydligt på förbättrade resultat på större djup (hål 2 och 3) och dessutom har de icke relevanta indikationer som syns till höger i den övre figuren eliminerats i och med användning av skjuvvågor.

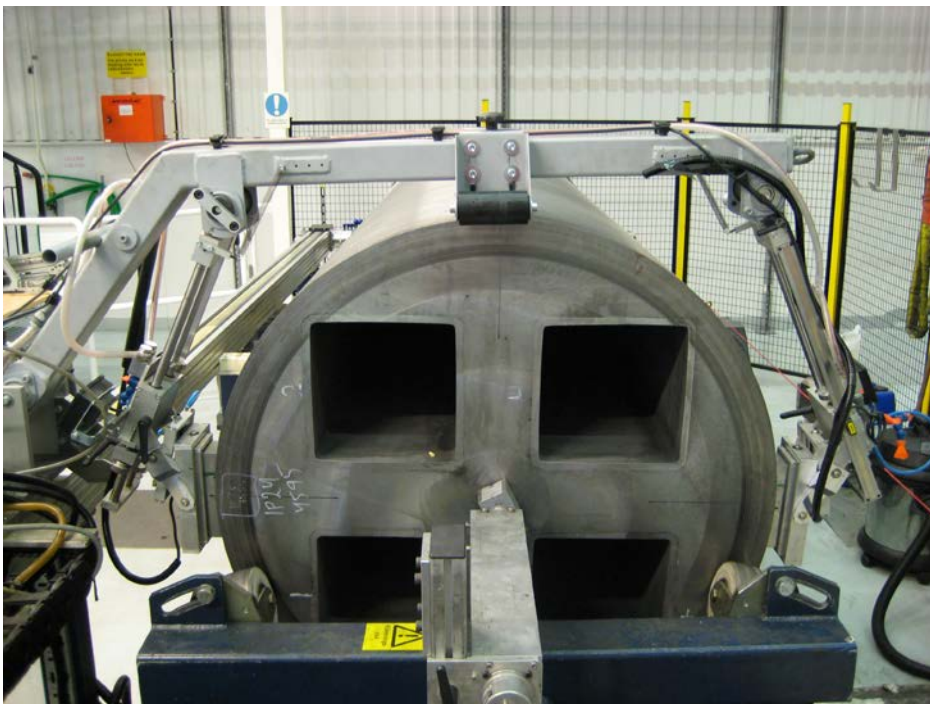


Figur 12-4. Simulerad signal till brusförhållande (SNR) för olika reflektorer med phased array-skjuvvågor och TRL-teknik.

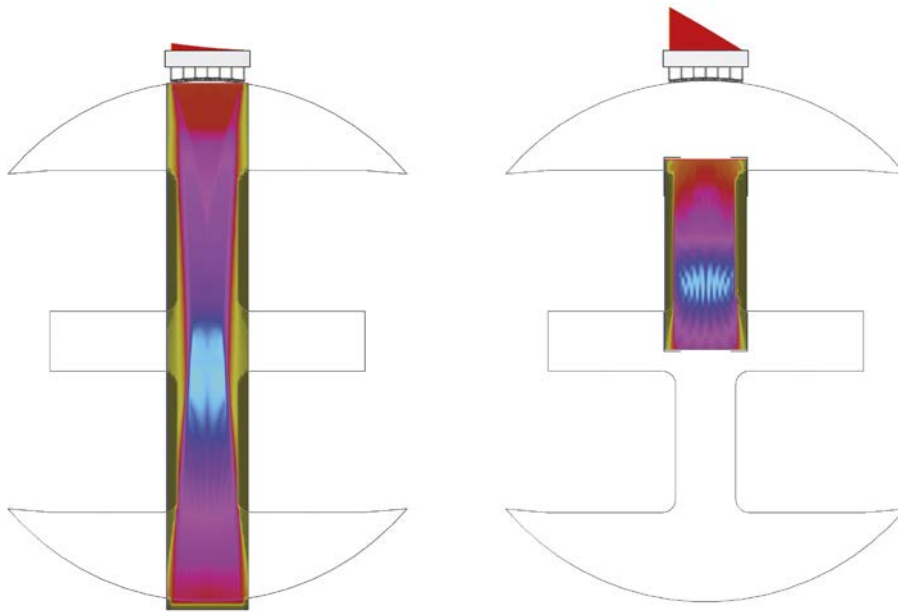


Figur 12-5. Fixtur med fyra stycken 32-elements linjärarrayer (1,7 MHz) för ultraljudsprovning av de yttre fem centimeterna med cirka 70° infallsvinkel med skjuvvågor.

För provning av området mellan kanlrören, som är det enda område där provningen skiljer mellan BWR- och PWR-insatser, har teknik i första hand utvecklats för provning av PWR-insatser. Skälet till detta är att denna typ av insats varit i fokus för tillverkningsförsök under den senaste perioden. Utvecklingen har gjorts med hjälp av ultraljudsmodellering. Provningen görs med både pulseko- och transmissionsteknik. Figur 12-6 visar provningsuppställningen och figur 12-7 visar ljudfälts-simuleringar av dessa tekniker.



Figur 12-6. Ultraljudsprovning av området mellan kanlrören på PWR-insats.



Figur 12-7. Resultat från ultraljudsmodellering, presenterad med en färgkodad signalamplitud, av ultraljudstekniken för provning av de centrala delarna i PWR-insatsen. Figuren till vänster visar transmissionstekniken där man valt att fokusera djupare än pulsekotekniken till höger som optimerats för området mellan kanalrören ner till centrum av insatsen.

Utöver volymprovningen som görs med ovan beskrivna ultraljudstekniker har även en förstudie avseende val av teknik för ytprovning gjorts. Efter initiala prov med virvelströmsteknik och magnetisk läckfältsmätning startades en studie för att ta fram lämpliga parametrar för virvelströmsprovning och testa dessa i full skala. Resultaten indikerade dels att materialets magnetiska/elektriska egenskaper var jämna, vilket är en förutsättning för tillämpning av tekniken, dels att defekter med ett avstånd till mantelytan på upp till cirka 0,5 millimeter kan detekteras.

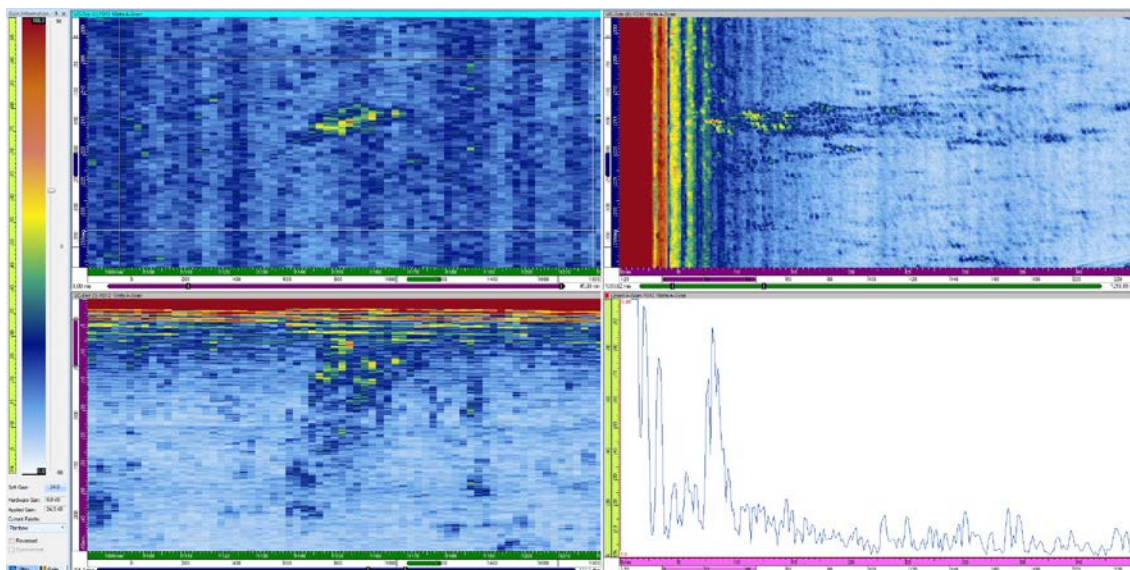
Samtliga beskrivna provningstekniker samt magnetpulverprovning hos tillverkaren av insatser har använts för provning av ett antal insatser. Resultaten visar att indikationer på defekter är sällsynta.

Genom att använda de utvecklade provningsmetoderna för provning av fullstora insatser har kunskapen om defekters förekomst och hur dessa avbildas med oförstörande provning ökat. Exempel på defekter som noterats är enstaka mindre porer och slag, ansamlingar av porer (porerkluster) samt i vissa fall allmänt orent material med stor andel porer/slag. En del av dessa defektindikationer har också undersökts med både datortomografi och förstörande provning. Ett exempel på ultraljudsresultat samt efterföljande datortomografi och metallografi kan ses i figurerna 12-8 och 12-9.

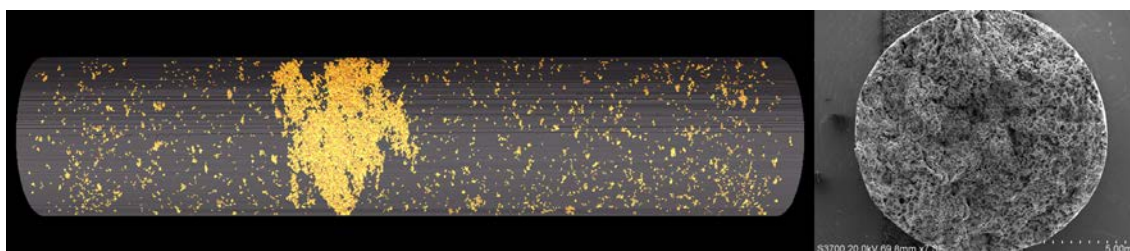
För att ytterligare öka kunskapen om möjliga defekters karakteristik har en studie påbörjats där mindre provobjekt (< 100 kg) med gjutdefekter tillverkas på ett kontrollerat sätt. Lämpliga gjutparametrar har bestämts genom simuleringar och gjutverktyg har utformats utifrån erhållna resultat. Några provobjekt har tillverkats och utvärdering av dessa görs under 2013. Målsättningen är att utreda om detta kan vara ett lämpligt tillvägagångssätt för att ta fram testblock för framtida verifiering av provningsteknik.

Som ett led i att utveckla tillförlitliga provningssystem har studier genomförts med syfte att minimera de så kallade mänskliga faktorerna vid mekaniserad provning. Både teoretiska studier och praktiska experiment har genomförts. Dessa har bland annat omfattat en studie med anpassad FMEA (Failure Mode & Effect Analysis) av både provning och utvärdering av data. Dessa studier visar att inverkan av de mänskliga faktorerna dominerar vid utvärderingen av data. Som följd av detta har preliminära provningsinstruktioner utvärderats både teoretiskt och i praktiska experiment. Resultatet av utvärderingen har sedan legat till grund för framtagning av reviderade och nya instruktioner.

Utöver detta har ett pågående projekt med syftet att utveckla metodik för att bestämma tillförlitligheten vid mekaniserad provning av kapseln fortsatt. Projektet drivs i samarbete med Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung i Berlin och avrapporteras under 2013.



Figur 12-8. Resultat från phased array-ultraljudsprovning av område med porositet visas i projektioner i tre riktningar, så kallade C-scan sett från mantelytan (övre till vänster), B-scan sett från ändytan (övre till höger) och D-scan sett längs med omkretsen (undre till vänster). Den maximala ultraljudssignalen som funktion av djup visas i ett så kallat A-scan (undre till höger).



Figur 12-9. Karakterisering av porositet indikerad i figur 12-8. Datortomografi (till vänster) och fraktografi av brottyta (till höger).

Program

Ett prioriterat område under kommande period är att utveckla teknik för att på ett kontrollerat och repeterbart sätt tillverka provobjekt med relevanta defekter i segjärn. Med utgångspunkt från dessa provobjekt kommer arbetet med utveckling av provningsmetoder att fortsätta med fokus på karakterisering och storleksbestämning av defekter. Arbetet med teknik för karakterisering av defekter kommer att göras i nära samarbete med framtagning av krav på insatsen. Provningsmetoden utvecklas så att detekterade defekter kan karakteriseras med avseende på de egenskaper som är viktiga för att säkerställa insatsens integritet. Dessutom planeras vidareutveckling av teknik för provning av insatsens ytor och ultraljudsprovning av insatsens botten.

12.5 Tillverkning och provning av komponenter i koppars

12.5.1 Tillverkning av kopparkomponenter

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SSM ansåg vid granskningen av Fud-program 2010 att kunskapen om orsaken till stråken med förhöjd kornstorlek i kopparrören behöver utredas.

Nuläge

SKB har valt extrusion som referensmetod för tillverkning av kopparrör. Metoden är robust och tillverkade rör uppfyller ställda krav.

Utredningsarbetet avseende stråk med förhöjd kornstorlek och ljuddämpning har genomförts. Ökad kornstorlek reducerar detekteringsförmågan vid ultraljudsprovning. Orsaken till stråken bedöms vara variationer i friktion, ojämn värmning samt icke exakt centrerung i extrusionsprocessen. SKB bedömer att effekten är möjlig att hantera, se avsnitt 12.5.2, men kan resultera i ett tilläggskrav rörande ljuddämpning. Fortsatt arbete för att minimera stråken med förhöjd ljuddämpning kommer att genomföras eftersom det är önskvärt att få en god marginal mot eventuella krav för framtida serieproduktion.

Värmebehandling av smidda kopparlock studeras och metoden har visat sig vara effektiv när det gäller att avlägsna effekter från kalldeformation. Kopparmaterialet uppvisar inga strukturförändringar och jämn hårdhet även i de inre delarna efter behandlingen. För att kontrollera förekomst av kalldeformation har hårdhetsmätning visat sig vara en lämplig metod.

Program

Vidareutveckling av dornpressning som tillverkningsmetod för kopparrör kommer att genomföras. Syftet är att kunna godkänna denna metod som alternativ referensmetod.

En värmebehandlingscykel för att avlägsna restspänningar i kopparlock och -bottnar kommer också att fastställas. Även smidesprocessen för tillverkning av lock och bottnar kommer att vidareutvecklas.

12.5.2 Provning av kopparkomponenter

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SSM ansåg i granskningen av Fud-program 2010 att sambandet mellan förhöjd ljuddämpning, medelkornstorlek och minsta detekterbara defekt vid oförstörande provning av kopparkomponenter behöver klargöras.

Nuläge

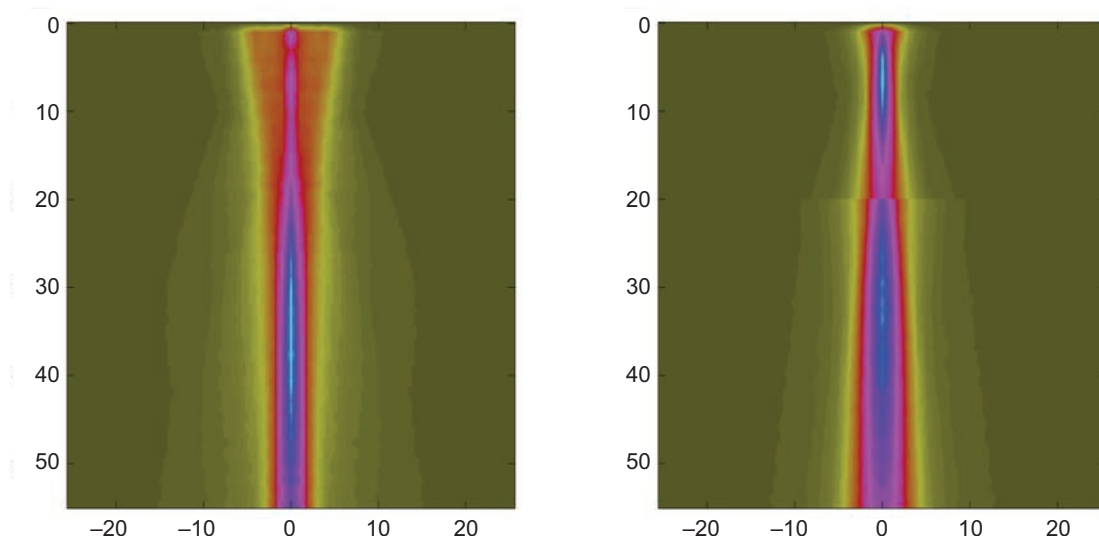
I Fud-program 2010 redovisade SKB provning med phased array-ultraljudsteknik med en provningsfrekvens på 5 MHz. Denna provningsteknik har vidareutvecklats med ett array med lägre frekvens (3,5 MHz) med syfte att förbättra detekterbarheten vid provning av material med variationer i kornstorlek. Dessutom har ljudets fokusering optimerats för att generera ett smalt ljudfält, vilket ger en högre detekteringsförmåga längs hela inspektionsdjupet. I figur 12-10 visas ljudfältssimuleringar av de båda teknikerna där det tydligt framgår att den optimerade tekniken har en bättre fokusering nära ytan.

En studie har initierats med utgångspunkt från frågeställningen hur förhöjd ljuddämpning till följd av större kornstorlek påverkar förmågan att detektera defekter. I denna studie har enkla reflektorer som flatbottenhål tillverkats i kopparrör med olika ljuddämpning. I ett första steg har inverkan av materialets ljuddämpning på signalen till brusförhållandet (SNR) studerats för flatbottenhål. Slutsatsen är att mer dämpande material har en tydlig påverkan på SNR vid ultraljudsprovning och att detekteringsförmågan därmed försämras, se figur 12-11.

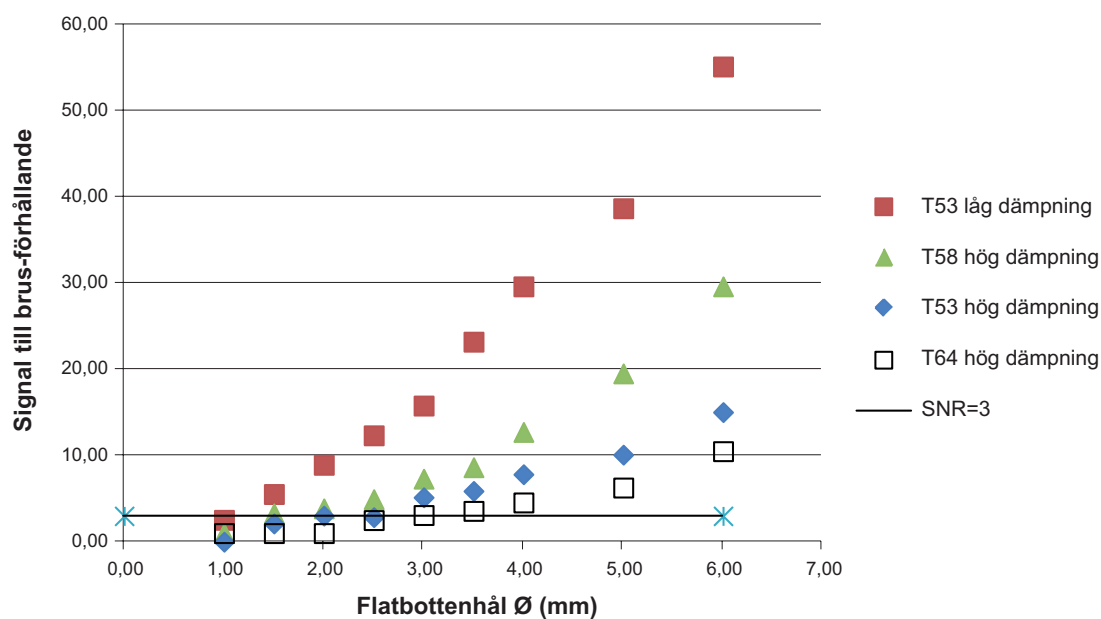
En känd defekttyp i smidda kopparlock är smidesveck. Detta är en av huvudorsakerna till att teknik för ytprovning av kopparkomponenterna behövs. Olika former av virvelströmsteknik har studerats vilket har resulterat i att en ny utrustning för detta har köpts in tillsammans med en array-givare anpassad för provning av koppar.

Program

Under kommande period fortsätter arbetet med att undersöka vilken effekt varierande ljuddämpning har på detekteringsförmågan vid ultraljudsprovning. Detta kommer att göras genom att POD-kurvor (Probability of Detection) beräknas för ultraljudsprovning av koppar med olika dämpning. Sambandet mellan ultraljudsdämpning och materialstruktur kommer även att studeras.



Figur 12-10. Resultat från ultraljudsmodellering i Civa. Figurerna visar, med en färgkodad signalamplitud, ljudfältens bredd i millimeter i arraygivarens aktiva riktning (x-axeln) som funktion av inspektionsdjupet 0–54 millimeter (y-axeln). Den vänstra figuren visar ursprunglig phased array-teknik (5 MHz) medan den högra figuren visar optimerad teknik (3,5 MHz). Den optimerade tekniken som är indelad i två fokusdjup resulterar i ett jämnare ljudfält längs hela inspektionsdjupet jämfört med den ursprungliga tekniken som endast har ett fokusdjup.



Figur 12-11. Signal till brus-förhållande (SNR) för flatbottenhål med olika diameter på 50 millimeters djup i normalt finkornigt extruderat material (rött) och olika nivåer av högre dämpande kopparrör (reduktion av bottenekoamplitud med 10–18 dB) där det dornpressade röret T64 (vitt) uppvisar lägst signal till brusförhållande.

Tekniken för provning av kopparkomponenternas ytor med array-teknik för virvelström kommer att vidareutvecklas. Dessutom kommer ultraljudsteknik för karakterisering och storleksbestämning av defekter att utvecklas. Utöver detta kommer en förstudie att startas med syfte att identifiera behov av provning av koppargöt samt att initiera nödvändig teknikutveckling.

Under 2013 påbörjas även en förstudie med syfte att ta fram metodik för att tillverka defekter i koppars på ett kontrollerat sätt.

12.6 Förslutning och provning av svetsen

12.6.1 Förslutning

Nuläge

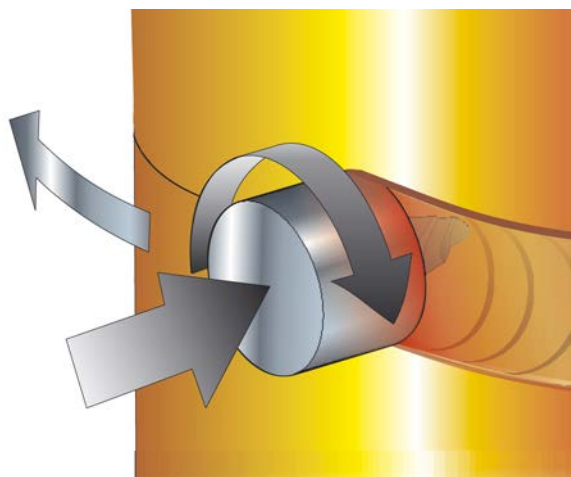
Sedan Fud-program 2010 har utvecklingen av svetsprocessen, friktionsomrörningssvetsning, (FSW), illustrerad i figur 12-12, fokuserat på att helautomatisera svetsproceduren. En regulator håller verktygstemperaturen mellan 790 och 910 °C, eftersom så kallade maskhålsdefekter bildas under 790 °C och svetsverktyget riskerar att gå sönder över 910 °C. För att verktygstemperaturen ska kunna hållas inom intervallet krävs att det roterande svetsverktyget genererar en varierande effekt/värmetillförsel under den 45 minuter långa svetscykeln, eftersom de termiska förhållandena förändras beroende på uppvärmning och geometriska förutsättningar.

Resultat från genomförda svetsningar på kopparkapslar visar att verktygets rotationshastighet är bäst lämpad för att styra verktygstemperaturen. Detta är ett logiskt resultat av att effekten som verktyget genererar ges av produkten av rotationshastigheten och motorns moment som fordras för att uppnå denna rotationshastighet. Den genererade effekten korrelerar därför väl med verktygstemperaturen (Cederqvist 2011) vilket gör att rotationshastigheten kan användas för att styra verktygstemperaturen.

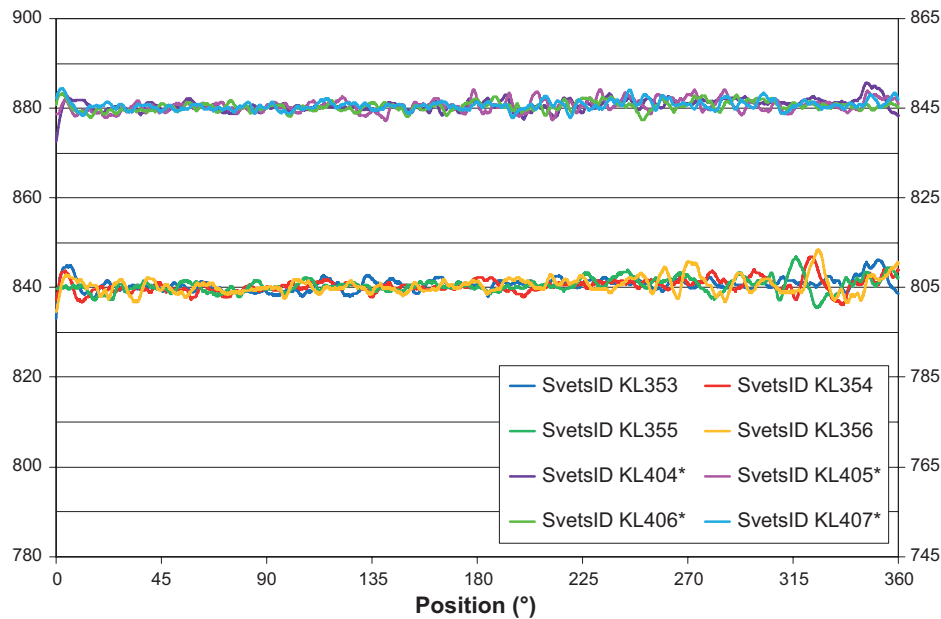
I juni 2010 hade en så kallad kaskadregulator utvecklats och verifierats vid korta svetscykler. Regulatorn bedömdes då vara klar för verifikation vid fullvarvscykler. Kaskadregulatorn reglerar både effekten och verktygstemperaturen, och har möjliggjort repeterbara svetsar där verktygstemperaturen runt hela foglinjen endast varierar med ± 10 °C från börvärdet. Figur 12-13 visar resultatet vid de åtta fullvarvssvetsar som gjordes vid verifikationen av regulatorn. Jämfört med det tillåtna processfönstret på cirka ± 60 °C innebär detta att den utvecklade kaskadregulatorn genererar svetsar som med god marginal producerats inom detta processfönster.

I Fud-program 2010 beskrevs den utveckling av svetsstappen som genomförts för att öka säkerhetsfaktorn mot brott. Det kan i detta sammanhang nämnas att de två tappar som användes vid verifikationen av kaskadregulatorn höll för de fyra fullvarvscykler de användes till. Det vill säga tapparna har en säkerhetsfaktor mot brott på minst 4 gånger.

När det gäller defekten foglinjeböjning efterfrågade SSM vid granskning av Fud-program 2010 en undersökning av vad som påverkar foglinjeböjningens utsträckning i radiell led. SKB har en pågående studie för detta. De parametrar som påverkar foglinjeböjningen är tappens längd, tappens relativa höjdläge mot foglinjen och svetsverktygets djup. Svetsverktygets djup går inte att variera så mycket, cirka $\pm 0,5$ millimeter. Detta eftersom verktygsskuldrans konvexa form motverkar förändringar i djupled och den kraft som styr djupet för närvarande hålls konstant. Genom att hålla svetsverktygets djup konstant undviker man att producera så kallat skägg och/eller störa processen. Vid genomförda svetsförsök har tappens längd och höjdläge relativt foglinjen varierats. Tappens längd har varierats mellan 48 och 52 millimeter med en millimeters steg och höjdläget har varierats ± 4 millimeter från centrerat läge.



Figur 12-12. Illustration av friktionsomrörningssvetsning.

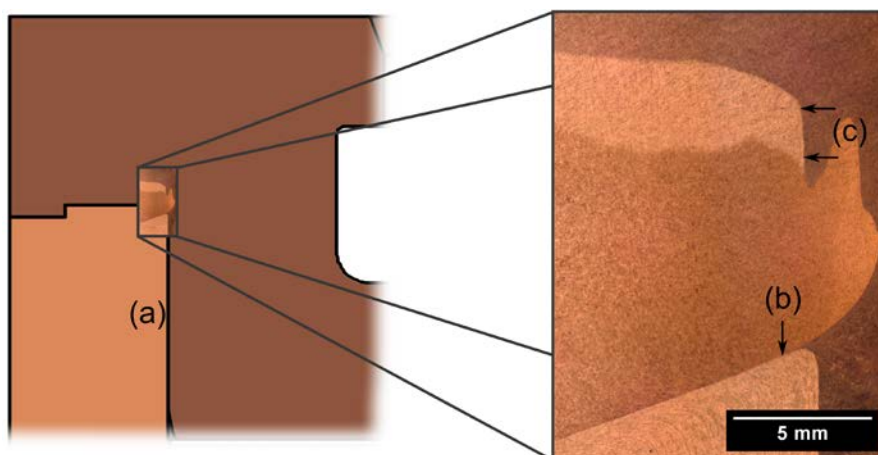


Figur 12-13. Verktygstemperaturen vid fullvarvscykler (360°). Notera att börvärdet var 840 eller 845 °C för de åtta verifieringssvetsarna. Värderna på högra y-axeln anges med *.

I figur 12-14 visas resultat från svetsning med en tapplängd på 52 millimeter och centrerat höjdläge. Förutom en foglinjeböjning på en millimeter vid (b) i figur 12-14 finns en del av den vertikala skarven mellan lock och rör, som innehåller oxidpartiklar. Vid svetsningen förflyttas denna del av skarven uppåt på grund av ett materialflöde runt verktygstappens spets. Förflyttningen illustreras av pilarna (c) i figur 12-14. Foglinjeböjningen reducerar kapselns korrosionsbarriär medan den förflyttade skarven inte medför någon reduktion av denna.

Syftet med denna studie är att utreda hur foglinjeböjningen och förflyttningen av skarven kan minskas eller om möjligt elimineras, samt att undersöka hur defekternas storlek och antal beror av svetsdjup och höjdlägen.

Ett forskningsprogram avseende förekomst av oxidpartiklar i svetsen har genomförts sedan Fud-program 2010. Ett antal svetsar, varav fyra fullvarvscykler, har utförts med ett nytt gasskydd runt svetshuvud och hela foglinjen. Svetsning med detta gasskydd medför att en stor del av svetsen enligt metallografiska undersökningar är fri från oxidinneslutningar. Oxidpartiklar förekommer vid vissa lägen, till exempel i den orörda delen av den vertikala skarven mellan lock och rör, se (a) i figur 12-14. De områden av svetsen där oxidpartiklar i huvudsak kvarstår är under starthålet och även till viss del i överlappsområdet.



Figur 12-14. Foglinjeböjning och förflyttad vertikal skarv.

Program

Den påbörjade studien beträffande foglinjeböjning och förflyttad skarv som beskrevs ovan kommer att slutföras under den kommande perioden.

Det pågående forskningsprogrammet avseende oxidpartiklar i svetsen kommer också att fortsätta. För närvarande pågår arbete med att mäta oxidationen vid olika syrgashalter och temperaturer i skyddsgasen argon. Denna information kombineras med mätningar av temperaturhistoriken vid foytorna för att beräkna mängden oxid som bildas i svetsen vid olika syrgashalter i skyddsgasen. Denna information ska användas till att härleda ett gränsvärde för tillåten syrgashalt under svetsningen. När gränsvärdet är satt ska gasskyddet runt svetsen modifieras för att verifiera att detta gränsvärde är möjligt att nå. De producerade svetsarna kommer även att genomgå mekanisk krypprovning.

12.6.2 Provning av svetsar

Nuläge

Tekniken för ultraljudsprovning av svetsar har vidareutvecklats sedan Fud-program 2010. Numera används ett array med lägre frekvens (3,5 MHz). Detta för att minska den effekt som eventuell varierande kornstorlek i kopparlocket har på provningens detekteringsförmåga. Utöver detta har ljudets fokusering och provningsvinklar optimerats så att hela svetsvolymen provas med bättre fokusering och med minst två vinklar.

För att få så hög och jämn detekteringsförmåga som möjligt i hela svetsvolymen har infallsvinkeln vid röntgen av svetsen minskats från 35° till 8°. Dessutom har det senaste årets svetsar provats med virvelströmsteknik för att ytterligare bygga upp kunskapen om ytnära och ytbrytande defekter.

Program

Under den kommande Fud-perioden vidareutvecklas virvelströmstekniken för provning av svetsytan och ultraljudstekniken för karakterisering och storleksbestämning av inre defekter, samt för att möjliggöra implementering av teknikerna i inkapslingsdelen av Clink. Dessutom utreds hur de olika provningsteknikerna (ultraljuds, radiografering och virvelströmsprovning) ska samverka optimalt så att detekteringsmålen för OFP uppfylls.

12.6.3 Tillverkning av kapslar i industriell skala

SKB:s produktionssystem för kapslar består av ett antal externa leverantörer som tillverkar kapselns komponenter, det vill säga insatser, kopparrör samt kopparlock och -bottnar. SKB har för avsikt att uppföra en kapselfabrik där kapselkomponenterna sätts samman och kapslarnas egenskaper slutkontrolleras. Fabriken kommer att ha utrustning för mekanisk bearbetning av kopparkomponenter och insatser samt utrustning för oförstörande provning, friktionsomrörnings-svetsning och montage. En förstudie pågår för att definiera det fortsatta arbetet med utvecklingen av kapselfabriken. SKB samarbetar med Posiva i frågan eftersom en gemensam kapselfabrik kan innebära samordningsvinster.

SKB kommer att ansvara för inköp av insatser och kopparkomponenter samt kvalitetsstyrning av hela produktionssystemet. Arbetet med kvalitetsstyrningen har initierats och en förstudie genomförs under 2013.

12.7 Hantering och deponering av kapslar i Kärnbränsleförvaret

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SSM ansåg i granskningen av Fud-program 2010 att SKB bör utföra en analys av transportsystemets möjlighet att hantera returtransport av defekta kapslar. Myndigheten ansåg dessutom att SKB bör utreda hur ett system för automatisk detektering av ytskador på kapslarnas kopparhölje före deponering ska utformas.

Nuläge och program

Returtransport av skadade kapslar är en del av återtagsprocessen som beskrivs i avsnitt 10.3.2. Utvecklingen av hur transporten ska genomföras görs som en del i utvecklingen av återtagssekvensen för Kärnbränsleförvaret. En utredning ska genomföras om huruvida återtagsprocessen leder till förändringar i krav avseende hantering av kapseln.

Detektering av ytskador på kapselns kopparhölje görs vid omlastningsstationen i Kärnbränsleförvaret. Här kommer samma typ av utrustning att användas som vid ytkontrollen i inkapslingsdelen av Clink. Försök med laserskanning av ytan har genomförts med gott resultat och en preliminär specifikation av utrustning finns. Under kommande Fud-period kommer acceptanskriterier för tillåtna ytskador att fastställas varefter fortsatt arbete med specifikation av utrustningen blir möjligt.

13 Teknikutveckling buffert, återfyllning och förslutning

Teknikutvecklingen som presenteras i detta kapitel omfattar tillverkning, hantering, installation och kontroll av buffert, återfyllning och pluggar för deponeringstunnlar. Framtagande av den konceptuella utformningen av förslutningen omfattas också.

Under avsnitt 13.2 Nuläge och program beskrivs status och övergripande planering. I avsnitten 13.3 till 13.9 redovisas resultat från utfört arbete samt planer för pågående aktiviteter och projekt.

I avsnitt 13.10 beskrivs integrationstester för installation av buffert, återfyllning och förslutning och i avsnitt 13.11 beskrivs försök i Äspölaboratoriet.

13.1 Krav och förutsättningar

13.1.1 Buffert

I Fud-program 2010 redovisade SKB att arbete pågick med att precisera konstruktionsförutsättningar för bufferten. Resultatet av detta arbete presenterades i produktionsrapporten för bufferten (SKB 2010f, kapitel 2) som ingår i ansökningarna för Kärnbränsleförvaret. De viktigaste av de där redovisade och nu gällande konstruktionsförutsättningarna för bufferten är:

- Halten av lermineralet montmorillonit i buffertmaterialet ska vara 75–90 procent av den totala torrvikten.
- Innehållet av organiskt kol i buffertmaterialet ska vara mindre än en procent.
- Totala svavelinnehållet får inte överstiga en procent, samtidigt får sulfidhalten inte överstiga 0,5 procent.
- Den installerade buffertens vattenmättade densitet ska vara 1 950–2 050 kilo per kubikmeter (kg/m^3).
- Buffertens dimensioner ska vara i enlighet med de som anges i SR-Can (SKB 2006b).
- Temperaturen i bufferten får inte överstiga 100 °C.

Därutöver finns krav relaterade till produktion och drift. Allmänt formulerat ska tillverkning och installation av bufferten baseras på väl beprövad eller testad teknik. Buffert med specificerade egenskaper ska vara möjlig att producera och installera med hög tillförlitlighet.

Konstruktionsförutsättningarna för bufferten revideras som en del av den översyn som beskrivs i avsnitt 10.2.1 Konstruktionsförutsättningar. För att kunna verifiera att kraven på bufferten uppfylls, kommer dessa att renodlas för att endast handla om parametrar som kan kontrolleras vid installation av bufferten. Följande konstruktionsförutsättningar planeras att revideras:

- Avseende buffertens dimensioner kommer hänvisningen till SR-Can att tas bort från kravet. Den ersätts med minimidimensioner där hänsyn också tas till de största tillåtna mellanrummen mellan buffert och kapsel och mellan buffert och bergvägg.
- Kravet på buffertdensitet planeras att ersättas av krav på minsta och största mängd buffertmaterial och hur dessa får fördelas i ett deponeringshål vid deponeringstillfället.

I inget fall innebär detta att slutsatserna i säkerhetsanalysen SR-Site (SKB 2011e) behöver revideras på annat sätt än att det ska vara än mer tydligt hur verifieringar görs av att konstruktionsförutsättningarna uppfylls.

13.1.2 Återfyllning och plugg

I Fud-program 2010 redovisade SKB att arbete pågick med att precisera konstruktionsförutsättningar för återfyllningen med tillhörande plugg. Resultatet av detta arbete presenterades i ansökan, i kapitel 2 i produktionslinjerapporten för återfyllning (SKB 2010g). De viktigaste av de där redovisade och nu gällande konstruktionsförutsättningarna för återfyllningen och plugg är:

- Återfyllningens hydrauliska konduktivitet ska vara lägre än 10^{-10} meter per sekund (m/s).
- Återfyllningens svälltryck ska vara högre än 0,1 megapascal (MPa).
- Återfyllningens packning och täthet, både för ett initialt torrt tillstånd och efter fullständig vattenmättnad, måste vara tillräckliga för att säkerställa en kompressibilitet som resulterar i en lägsta densitet hos den mättade bufferten i enlighet med de givna förhållandena (det vill säga $1\,950\text{ kg/m}^3$) med tillräcklig marginal för förlust av återfyllning och för osäkerheter.
- Det primära kravet på pluggen är att den ska fungera som mothåll mot grundvattenstrycket och det svälltryck som återfyllningen utvecklar i en deponeringstunnel. Pluggkonstruktionen ska också hindra vattentransport ut ur deponeringstunneln.

Därutöver finns krav relaterade till produktion och drift. Allmänt formulerat ska återfyllningen baseras på väl beprövad eller testad teknik. Återfyllning med specificerade egenskaper ska vara möjlig att producera och installera med hög tillförlitlighet.

Konstruktionsförutsättningarna för återfyllningen revideras som en del av den översyn som beskrivs i avsnitt 10.2.1 Konstruktionsförutsättningar. Följande konstruktionsförutsättningar planeras att revideras:

- Eftersom inflödena i deponeringstunnlarna kan variera, övervägs att koppla metod för återfyllning till det faktiskt uppmätta inflödesmönstret i deponeringstunneln. För varje återfyllningslösning ska det därmed finnas angivet och redovisat under vilka inflöden denna metod får användas. En motsvarande förändring planeras även för kraven på inflöden till en deponeringstunnel, se avsnitt 14.1.
- En precisering av täthetskravet på pluggkonstruktionen.

I inget fall innebär detta att slutsatserna i säkerhetsanalysen SR-Site behöver revideras på annat sätt än att det ska vara än mer tydligt hur uppfyllandet av konstruktionsförutsättningarna kan verifieras.

13.1.3 Förslutning

I Fud-program 2010 redovisade SKB att arbete pågick med att precisera konstruktionsförutsättningar för förslutningen. Resultatet av detta arbete presenterades i ansökan, i kapitel 2 i produktionslinjerapporten för förslutning (SKB 2010h). De viktigaste av de där redovisade och nu gällande konstruktionsförutsättningarna för förslutningen är:

- Förslutningen får inte försämra de övriga barriärernas funktion i någon betydande grad. Den ska också bibehålla sin barriärfunktion under lång tid i den miljö som kommer att råda i Kärnbränsleförvaret.
- Förslutningen i stamtunnlarna ska förhindra att återfyllningen i anslutande deponeringstunnlar förlorar sin barriärfunktion genom att den expanderar eller transporteras ut ur tunnlar.
- Genomgående gäller att förslutningen i ett bergutrymme inte får påverka förslutningen i ett intilliggande bergutrymme så att dess funktion äventyras. I de översta delarna av rampen och schakten ska förslutningen (toppförslutningen) utformas så att den avsevärt försvårar intrång i förvaret.
- Under toppförslutningens nivå måste den integrerade effektiva konnekterade hydrauliska konduktiviteten vara lägre än 10^{-8} m/s. Detta gäller återfyllningen i tunnlar, ramp och schakt och den skadade zonen som omger dem. Det här värdet måste inte upprätthållas i sektioner där exempelvis tunneln eller rampen går genom kraftigt transmissiva zoner. Det finns ingen begränsning för den hydrauliska konduktiviteten i centralområdet.
- Borrhål, borrade såväl från ytan som från utrymmen i förvaret, måste förslutas. En preliminär bedömning är att detta kan uppnås om borrhålsförslutningen har en hydraulisk konduktivitet som är mindre än 10^{-8} m/s. Högre hydraulisk konduktivitet accepteras i sektioner där borrhålet passerar zoner med förhöjd transmissivitet.

Konstruktionsförutsättningarna för förslutningen revideras som en del av den översyn som beskrivs i avsnitt 10.2.1 Konstruktionsförutsättningar. Följande konstruktionsförutsättning planeras att revideras:

- Baserat på genomförda känslighetsanalyser övervägs att ändra kravet på högsta accepterade hydrauliska konduktivitet i förslutna borrhål. Fördelen med att acceptera högre hydraulisk konduktivitet är att det möjliggör lösningar avseende borrhållsförslutning där det kan bli enklare att visa långsiktig beständighet.

13.2 Nuläge och program

Sedan Fud-program 2010 har SKB lämnat in ansökningar för Kärnbränsleförvaret. I produktionslinjerapporterna för buffert (SKB 2010f), återfyllning (SKB 2010g) och förslutning (SKB 2010h) beskrivs referensutformningen. I arbetet med produktionslinjerapporterna identifierades behov av vidareutveckling och tester som beskrevs i Fud-program 2010. Detta arbete pågår och kommer i huvudsak att färdigställas och rapporteras under 2013.

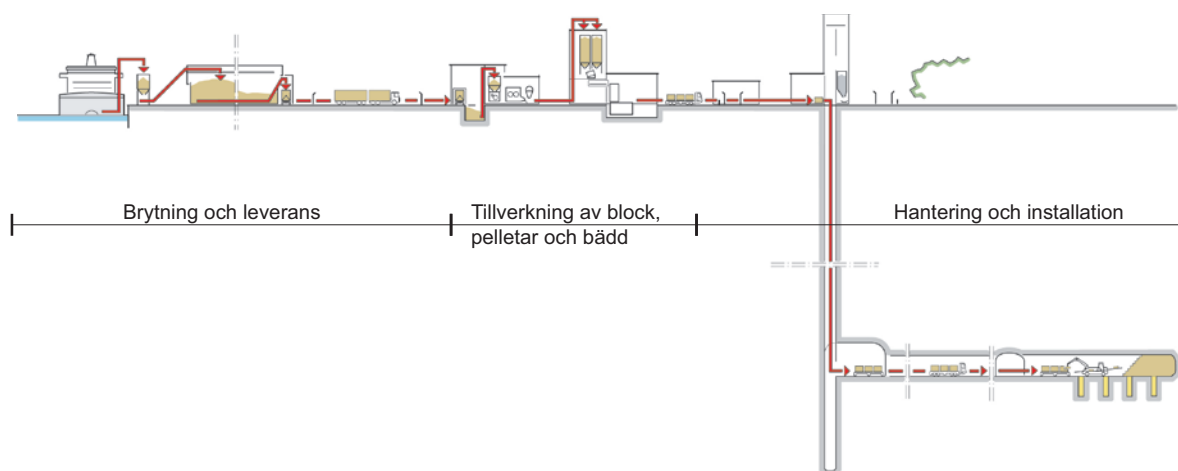
I Fud-program 2010 konstaterades att det finns ett antal utvecklingsfrågor som griper över hela systemet buffert, återfyllning och förslutning. Följande insatser identifierades:

- Bryta yttre sektionen av Prototypförvaret i Äspölaboratoriet. Syftet med denna demonstration i full skala är att komplettera kunskapen om hur buffert, plugg och återfyllning fungerar.
- Utredda och värdera alternativa metoder för deponering och återfyllningssekvenser.
- Utveckla system och utrustning för transport av buffert och återfyllningsmaterial mellan produktionsbyggnad och aktuellt deponeringsområde i förvaret.

I figur 13-1 illustreras produktionslinjen för buffert (SKB 2010f).

Det underlag som redovisades i ansökan beskrev konceptuella utformningar av buffert, återfyllning inkluderande valvplugg samt förslutning. Därefter har fortsatt teknikutveckling bedrivits för att starta arbetet med systemkonstruktion för buffert, återfyllning och pluggar i deponeringstunnlar enligt leveransstyrmodellen, se avsnitt 10.2.3 Leveransstyrmodell.

I slutet av 2010 bröts pluggen till den yttre sektionen av Prototypförvaret och under 2011 återtogs återfyllningen samt buffert och kapslar i de två deponeringshålen. Under 2013 sammanställs och utvärderas resultaten från fältarbetet och laboratorieprogrammet för den yttre sektionen. Resultaten avrapporteras i slutet av 2013 i en teknisk huvudrapport med referenser till ett flertal underlagsrapporter.



Figur 13-1. Produktionslinjen för buffert (SKB 2010f).

Bland annat kan följande preliminära slutsatser dras från brytningen av Prototypförvarets yttre sektion och analyserna av återfyllning och buffert:

- Återfyllningen var vid utgrävningen helt vattenmättad i alla delar av tunneln.
- Inga tecken på piping eller erosion av återfyllningen observerades vid utgrävningen.
- Initiala mellanrummen mellan kapslarna och buffertblocken fanns som väntat inte kvar vid återtaget.
- Uppåtriktad svällning av bufferten har skett under vattenupptagningen vilket resulterat i minskad densitet för bufferten i de övre delarna av deponeringshålen.
- Bufferten i de två deponeringshålen var inte vattenmättad i alla delar efter åtta års naturlig bevätning. En god kontakt mellan buffert och berg observerades vid brytningen.

Fortsatt utveckling har skett för att vidareutveckla koncept för förslutning av slutförvaret. Utredningar och utvecklingsinsatser har genomförts om alternativa referensutformningar. Detta för att utvärdera möjligheterna till optimerad utformning av buffert och återfyllning från ett produktionsperspektiv, som inte negativt påverkar förvarets långsiktiga funktion.

Arbete med att omhänderta de materialfrågor och analysmetoder som behövs inför start av detaljprojektering av produktionsbyggnad har initierats under den gångna Fud-perioden.

Den successiva utvecklingen av referensutformningen avseende återfyllningen av deponeringstunnlar pågår. Fokus kommer att läggas på vatteninflödet och på att säkerställa tillräckligt mothåll för att begränsa buffertens vertikala expansion.

Under den kommande Fud-perioden kommer SKB att påbörja de aktiviteter avseende kvalitetsstyrning och kontroll som beskrivs i avsnitt 10.2.2 Kvalitetsstyrning och kontroll.

Under perioden planeras även integrerade tester av installation av buffert och återfyllning. I ett efterföljande steg som ligger efter kommande Fud-period planeras fullskaliga installationstester för buffert, återfyllning och plugg, se avsnitt 13.10 Integrationstester.

13.2.1 Buffert

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 konstaterades att studier visar att det går att uppnå densitet och materialsammansättning hos pressade block och pelletar inom de intervall som krävs enligt konstruktionsförutsättningarna. För extrema kombinationer av geometri hos deponeringshålen och densitet för buffertblock och pelletar kan den vattenmättade densiteten för installerad buffert lokalt ligga utanför gränserna för acceptabelt densitetsintervall.

Vidare konstaterades att det med konventionell teknik bör vara möjligt att ytterligare minska variationsbredden för densitet och materialsammansättning, vilket bedöms vara en fördel ur säkerhetssynpunkt även om inga formella krav har ställts. Enligt SSM:s granskning bör SKB ta fram ett kvalitetsprogram för bufferttillverkning. Teknikutvecklingsprogrammet bör, förutom kompaktering, innefatta bland annat materialval, verifiering av mineralsammansättning, kontroll av densitet, vattenkvot samt homogenitet för block och ringar. SSM ansåg vidare att ett relativt stort antal fullskaliga block och ringar behöver framställas. Motivet för detta är att ge ett statistiskt meningsfullt underlag för bedömningen om homogena block och ringar med rätt densitet utan oacceptabla skador kan tillverkas.

Enligt SSM:s granskning är det svårt att bedöma genomförbarheten av den nya deponeringsmetoden med gummiduk (SKB 2010f) innan tillräckligt många fullskaliga tester har genomförts. SSM ansåg dessutom att SKB bör redovisa om buffertskyddet kommer att användas i alla deponeringshål eller om användningen kommer att anpassas till eventuellt behov som kopplar till vatteninflödet i deponeringshålet. Vidare bör SKB redovisa om buffertskyddet går att använda i deponeringshål där spjälkning har inträffat. SSM var positiva till att SKB planerar att vidareutveckla de komponenter som används vid installationen av bufferten: bottenplattan, buffertskyddet, strålskyddet och körplåten. Det var också positivt att SKB avsåg att göra försök i Äspölaboratoriet där alla ingående

komponenter i ett deponeringshål testas tillsammans. SSM höll med Östhammars kommun att referensutformning med avseende på övriga komponenter (förutom buffert) som ingår i deponeringssekvensen bör tas fram.

Sammanställning av nuläge och program

Som en del av ansökan togs produktionsrapporten för buffert fram (SKB 2010f). I den rapporten adresserades många av SSM:s kommentarer på Fud-program 2010. Förutom det arbete som redovisades i produktionslinjerapporten har systemkonstruktionen av bufferten påbörjats. Det innefattar även att ta fram en förbättrad utformning av bottenplatta och buffertskydd.

Utöver arbetet med att utveckla referensutformningen för bufferten har separata utredningar och utredningsinsatser för en alternativ utformning av bufferten genomförts. Slutsatserna från detta arbete redovisas under avsnitt 13.6.1 Installation av buffert.

Under den kommande Fud-perioden kommer arbete med att förbättra referensutformningen att genomföras. Parallellt med detta görs fortsatta utredningar av alternativa utformningar. Baserat på detta arbete kommer SKB att välja att gå vidare med gällande referensutformning eller med en alternativ utformning. För den valda utformningen kommer en systemkonstruktion att genomföras. Detta kommer bland annat att inkludera tester i full skala under jord.

Det fortsatta utvecklingsarbetet inom buffertlinjen har följande mål:

- Utveckla utformningen och tekniken för installation av bufferten inom ramen för vald referensutformning. Detta görs så att systemkonstruktion kan fastläggas före byggstart och så att implementering kan drivas innan samfunktionsprovet startar.
- Vidareutveckla metod och konstruera utrustning för att tillverka (pressa), bearbeta och hantera buffertblock. Detta görs för att vara klart när systemkonstruktionen av produktionsbyggnaden påbörjas.

13.2.2 Återfyllning

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 konstaterades att utvecklingen av återfyllningen passerat konceptfasen samt att de förväntat mycket låga inflödena av grundvatten i Forsmark bör kunna möjliggöra en enklare installation av återfyllningen.

Produktionslinjerapporten för återfyllning (SKB 2010g) visar att vald referensutformning för återfyllningen är tekniskt möjlig att åstadkomma och att den uppfyller angivna konstruktionsförutsättningar.

SSM ansåg i sin granskning av Fud-program 2010 att det krav som kopplar till barriärfunktionen att begränsa buffertens uppåtriktade svällning i deponeringshålet bör förtydligas. Avsaknaden av ett kvantitativt krav försvårar framtagande av designkriterier och kontroll vid tillverkning, hantering och installation av återfyllningen.

SSM var positiva till mycket av det arbete som genomförts av SKB och Posiva. SSM ansåg att SKB behövde vara öppna för ytterligare modifikationer av konceptet för återfyllning av deponeringstunnlar. Återfyllningens koncept har förändrats flera gånger när nya förutsättningar tillkommit eller när konceptet analyserats noggrannare.

SSM menade att ytterligare insatser krävs för att visa att återfyllningen av en deponeringstunnel kan installeras så att alla krav på långsiktig säkerhet uppfylls. SKB bör vidare studera de svårigheter som kan förekomma vid installation av återfyllning såsom inverkan på dess densitet vid oregelbunden geometri av deponeringstunneln. Detta gäller även inverkan av grundvatteninflöde som åstadkommer piping.

Sammanställning nuläge och program

Vidareutveckling och systemkonstruktion av återfyllningen inom vald referensutformning har pågått sedan 2010. Ett koncept för hanteringsprocessen och utrustning som behövs vid installation har tagits fram och större delen av prototyputrustningen är konstruerad. Storleken på återfyllningsblocken och staplingsmönster har vidareutvecklats jämfört med referensutformningen. Konceptet bygger på att en industrirobot, placerad på en rörlig plattform, används. Med hjälp av ett specialutformat lyftverktyg flyttas och placeras återfyllningsblocken ett och ett efter ett specifikt mönster. Preliminära resultat visar att det valda staplingsmönstret blir så stabilt att pelletbädden på tunnelgolvet inte behöver kompakteras.

En preliminär rapport är framtagen som redovisar definierade krav på bland annat återfyllningsblock, pelletar, lägsta blockfyllnadsgrad, tunnelgeometrier och installation. Vidare redovisas ett preliminärt kvalitetsprogram för tillverkning och installation av återfyllning.

Både pelletar och återfyllningsblock har tillverkats i stor skala vilket givit erfarenheter inför industrialiseringen.

Ett antal alternativa metoder för att ta hand om inflödande vatten vid installation har identifierats.

Ett försök med installation av återfyllning i Äspölaboratoriet är inplanerat till början av 2014. Syftet med detta försök är att säkerställa att tänkt metod för återfyllning och kontroll av genomförd installation fungerar som avsett. Baserat på testerna kommer referensutformningen att utvärderas och eventuellt justeras. Under den kommande Fud-perioden kommer systemkonstruktionen av återfyllningen att färdigställas. Förutom den standardmässiga återfyllningsprocessen för relativt torra tunnlar kommer särskilt fokus att läggas på olika metoder för att hantera vatteninflöden. Detta kommer att inkludera ytterligare tester i laboratorieskala och eventuellt i full skala. I slutet av Fud-perioden genomförs ett integrerat installationstest av buffert och återfyllning.

13.2.3 Plugg för deponeringstunnlar

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 konstaterades att det återstår utvecklingsarbete för utformning av pluggar. Det gäller bland annat vilka täthetskrav som behöver ställas för att säkerställa ett kontrollerat svällningsförlopp hos återfyllningen och för att i tillräcklig grad förhindra kanalbildning och erosion i buffert och återfyllning.

Det fortsatta utvecklingsarbetet för pluggen beskrevs ha följande mål:

- Slutföra konstruktion av pluggen för deponeringstunnlar så att systemkonstruktion kan fastläggas före byggstart och så att implementeringsfasen har uppnåtts innan samfunksprovningen inleds.

SSM ansåg i sin granskning av Fud-program 2010 att SKB bör göra ytterligare insatser avseende kravspecifikationen och konceptutvecklingen för pluggar för deponeringstunnel. Vissa ytterligare åtgärder kommer enligt SSM att krävas för att visa att kravet på pluggens täthet kan uppfyllas. SSM menade att SKB mer ingående bör redovisa vattentransporten genom pluggen. Tätheten vid skärningsytan mellan pluggen och tunnelväggen bör beläggas bättre. SSM ansåg dessutom att SKB bör utreda låg-pH-betongens geomekaniska egenskaper. I SKB:s modelleringar används generiska parametrar som gäller allmänna betongmaterial vilka möjligen inte överensstämmer med parametrarna för låg-pH-betong.

Sammanställning av nuläge och program

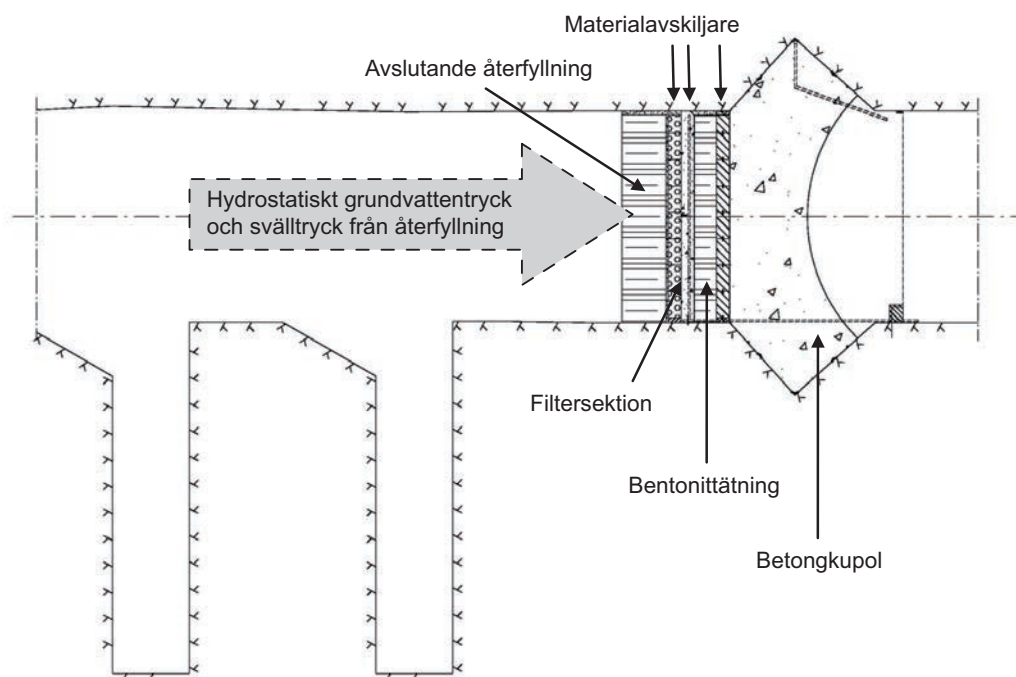
Referensutformningen av pluggar för deponeringstunnlarna utgörs av ett system som innefattar den avslutande delen av återfyllningen, en filtersektion, materialavskiljare, bentonittätning och ytterst en platsgjuten betongkonstruktion som huvudsakligen fungerar som mothåll (SKB 2010g).

I Kärnbränsleförvarets pluggar ska betongdelen utföras i låg-pH-betong i stället för konventionell betong. Orsaken till detta är att i största möjliga mån undvika de negativa effekter som basiska material kan ha på bentonitlerans egenskaper. För detta ändamål har ett unikt betongrecept B200 (Vogt et al. 2009) tagits fram i syfte att uppfylla de krav som ställs på designen. Förutsättningarna för armering, kylning och injektering är i och med detta skilda mot användandet av standardbetong.

I en rapport (Malm 2012) redovisas en utvärdering av pluggens utformning med fokus på betongkonstruktionen. Rapporten presenterar utredningar och motiv för valet av utformning. Syftet med rapporten har också varit att redovisa utredningar om och sammanställningar av de laster som verkar på pluggsystemet. Detta för att bringa klarhet i betongpluggens bärförmåga. Betongpluggens funktion är i första hand att fungera som ett mothåll, men har också höga krav på täthet vilket påverkar utformningen av betongkonstruktionen.

Två konceptskiljande alternativ har utvärderats, dels en kupolformad plugg, se figur 13-2, dels en lång kilformad friktionsplugg. Numeriska beräkningar har utförts, som omfattar båda konstruktionerna, för förekommande lastfall. Inom ramen för detta har även olika geometrier studerats liksom betongkonstruktioner utförda med respektive utan armering. Sammanfattningsvis redovisar Malm (2012) potentialen i att använda en oarmerad kupolkonstruktion tillsammans med låg-pH-betongen B200 som mothåll till såväl den svällande leran som till grundvattentrycket i deponeringstunneln. Fördelarna med att kunna utföra betongkupolen helt utan armering är att man undviker risker för armeringskorrosion och sprickbildning relaterade till armeringen med anledning av låg-pH-betongens krympning. Därtill erhålls tidsvinster och viss kostnadsbesparing vid installation.

I samband med att den yttre sektionen av Prototypförvaret öppnades 2011 togs bland annat fyra kärnbrorprover i pluggens slits, det vill säga i gränssnittet mellan berg och betong. Syftet var att visuellt undersöka resultatet av den kontaktinjektering med Silicasol som utfördes efter att pluggen hade gjutits 2003. Samtliga prover visade på en väl utförd kontaktinjektering, resultat som kommer att ingå i slutrapporteringen från Prototypförvaret, se avsnitt 13.11 Prototypförvaret. Kontaktinjektering, som utförs under nedkyllning av betongkupolen, behövs för att erhålla en tidig tätningfunktion (innan bentonittätningen är vattenmättad) samt för att få betongkupolen fullt inspänd mot berget när kylningen upphör. Planerad teknik för kylning och kontaktinjektering i referensutformningen skiljer sig inte mycket från den som användes för Prototypförvarets pluggar (Dahlström 2009).



Figur 13-2. Referensutformning av kupolformad plugg för en deponeringstunnel. Betongkupolen utförs oarmerad i låg-pH-betong B200.

Ett fullskaligt test av den uppdaterade pluggutformningen har installerats i Äspölaboratoriet. Testet kommer att drivas under kommande Fud-period. Detta beskrivs under avsnitt 13.8 Pluggning av deponeringstunnlar.

13.2.4 Förslutning

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 konstaterade SKB att förslutning av förvaret inte kommer att påbörjas förrän allt använt kärnbränsle har deponerats. Detta gäller med undantag för vissa borrhål. Detaljkonstruktion och implementering av förslutningstekniken är därför inte aktuellt förrän om mer än 50 år. Nu gällande referensutformning, som i väsentliga delar bygger på referensutformningen för återfyllningen, kommer därför sannolikt att modifieras och förenklas så att den svarar mot de lägre krav som bör gälla för förslutningen jämfört med återfyllningen. Det gäller både materialsammansättning och geometrisk konfiguration. De krav som behöver ställas på berguttaget i delar av tillfarterna utgör ett viktigt undantag. Dessa behöver fastläggas före byggstart för att säkerställa att utformningen och produktionen av tillfarterna möjliggör en ändamålsenlig förslutning.

I sin granskning av Fud-program 2010 såg SSM positivt på att SKB planerar ytterligare insatser i samband med utvecklingen av konceptet för förslutningen. SSM ansåg dock att SKB ytterligare bör utreda genomförbarheten av olika förslutningskoncept. Förslutningen ligger visserligen långt fram i tiden, men den är av betydelse för Kärnbränsleförvarets helhet och därmed även för kraven och teknikutvecklingen av andra delar av slutförvaret. Därutöver menade SSM att SKB bör studera förslutningens långsiktiga stabilitet med avseende på degradering av betongmaterial samt kemisk erosion av bentonit med glacialt smältvatten.

SSM ansåg att SKB bör beakta resultaten från platsundersökningen och bättre motivera de krav som ställs på förslutningen. SKB bör dessutom förtydliga det översta grövre bergmaterialets roll i förslutningen, som sträcker sig ned till 50 meters djup.

Sammanställning av nuläge och program

I ansökan redovisades en referensutformning där ramp och schakt fylldes med block och pelletar av bentonit upp till 200 meter under marknivå (SKB 2010h). Denna planeringsförutsättning har senare ändrats, se avsnitt 13.9 Förslutning av Kärnbränsleförvaret.

I SR-Site (SKB 2011e) utvärderades referensutformning och konstruktionsförutsättningar. Där konstaterades att konstruktionsförutsättningarna som låg till grund för referensutformningen var tillfyllest. Vidare konstaterades det i SR-Site att känslighetsanalyser, där de hydrauliska egenskaperna för de återfyllda schakten och rampen varierar, skulle krävas för att kunna mildra konstruktionsförutsättningarna. Vidare konstaterades att referensutformningen förmodligen skulle kunna förenklas och samtidigt uppfylla konstruktionsförutsättningarna. Därmed finns ytterligare möjligheter till en förenklad utformning.

I SR-Site utvärderades också referensutformningen för borrhålsförslutningen. Utvärderingen visade att inverkan från dåligt förslutna borrhål var mycket begränsad. Vidare konstaterades det i SR-Site att konstruktionsförutsättningarna är tillfyllest, men möjligen att kraven är för högt ställda, då även öppna borrhål utan förslutning verkar ha mycket begränsad inverkan på grundvattenflödet i slutförvaret. Detta gav möjligheter att förenkla referensutformningen.

Baserat på slutsatserna i SR-Site har känslighetsanalyser genomförts där den hydrauliska konduktiviteten i schakt och ramp samt den störda zonen varierats (Luterkort et al. 2012). Nivån under markytan för förslutningen bestående av block och pelletar av bentonit varierades också.

Slutsatsen var att kraven på förslutning av både schakt och ramp kan mildras och att referensutformningen av förslutningen därmed kan förenklas. Med detta som underlag beslutade SKB att ingen speciell hänsyn till förslutningens genomsläpplighet behöver tas mellan marknivå och ned till 100 meter ovan förvarsnivån.

Ingen särskild teknikutveckling bedöms i nuläget behövas för förslutningen. I samband med att produktionslinjerapporten för förslutningen uppdateras kommer placering av mekaniska pluggar med mera att beskrivas i större detalj. Placeringen är bland annat beroende av vatteninflöde till tunnlarna och i vilken ordning tunnlarna ska förslutas. Se även avsnitt 13.9 Förslutning av slutförvaret.

13.3 Materialstudier bentonit

Nuläge

Sedan Fud-program 2010 har tre olika leveranser av återfyllningsmaterial undersökts, två leveranser av natriumbentonit från Kutch i Indien samt en leverans av en naturlig kalciumbentonit från Milos i Grekland. En rad olika materialparametrar har undersökts vilket har lett till en ökad kunskap om materialet.

Halten av montmorillonit i återfyllningsmaterialet ska vara tillräckligt hög för att återfyllningen ska uppfylla de krav som finns på hydraulisk konduktivitet och svälltryck. Hur hög halten av montmorillonit ska vara för att uppfylla kraven utreds för närvarande.

Hållfastheten hos återfyllningsblocken är beroende av parametrar som materialsammansättning, vattenhalt, densitet och granulstorleksfördelning. Dessa parametrar är viktigt att ha kontroll på för att kunna producera block av bra kvalitet.

Program

För att säkerställa att metoder och kunskap finns för att kunna specificera, analysera och kontrollera de egenskaper som krävs för buffert och återfyllningsmaterial kommer SKB de närmaste åren att genomföra teknikutveckling på dessa områden. Olika leverantörers kvalitet av bentonit och deras system för att garantera detta i sina leveranser kommer att gås igenom. Både parametrar som är viktiga för långsiktig säkerhet samt parametrar som är viktiga för att åstadkomma en robust produktion av buffert och återfyllningskomponenter kommer att hanteras. Här ingår också att titta på hur egenskaper såsom granulstorleksfördelning och pressteknik påverkar egenskaperna hos den färdiga produkten. Inventering av bentonitleverantörer kommer att genomföras. Se även avsnitt 25.4.4 Bentonitsammansättning och 25.4.5 Montmorillonitsammansättning.

13.4 Produktion av buffert och återfyllningskomponenter

13.4.1 Produktion av buffertblock och -ringar

Nuläge

Sedan Fud-program 2010 har cirka 50 block producerats med enaxlig pressteknik, se figur 13-3. Dessa block har producerats i en nytillverkad form med en större ytterdiameter än tidigare. Blocken har sedan bearbetats.

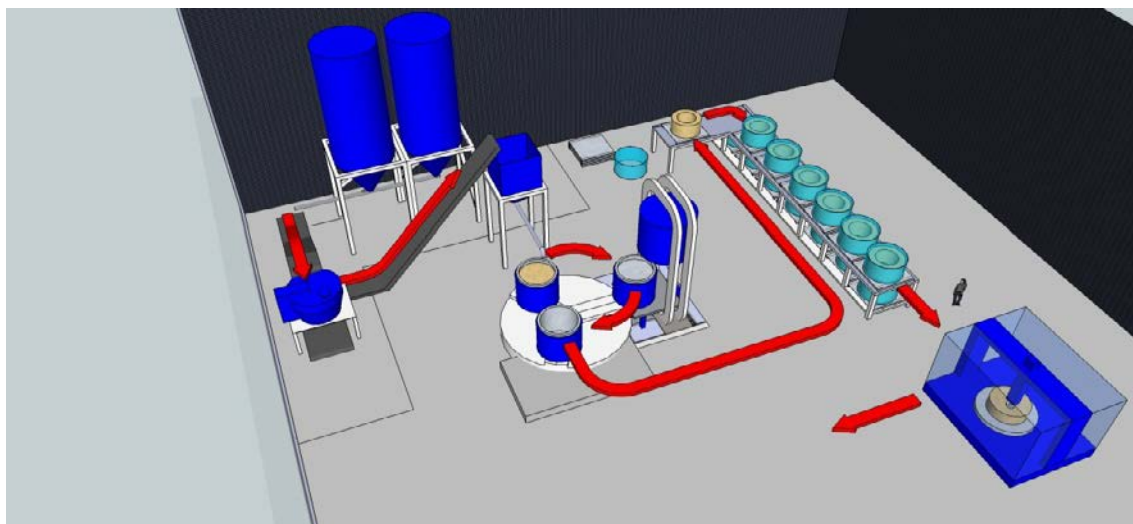
På grund av de begränsningar som finns i befintliga pressar kan i dag block med en maxhöjd på 500 millimeter pressas. Det är i dag inte möjligt att kompaktera ringar enligt referensutformningen där blocken är 800 millimeter höga. Därför pågår det arbete med modellering och skalförsök för att undersöka möjligheten att kompaktera ringar enligt referensutformningen. Om det av praktiska skäl visar sig fördelaktigt att använda block med lägre höjd kan referensutformningen ändras.

Arbete med att utforma processen för produktion av buffertblock pågår. I figur 13-4 illustreras en schematisk beskrivning av processen som ett exempel.

Möjligheten att producera helt cylindriska block, som inte behöver bearbetas, har utretts och ett förslag på princip för pressform har tagits fram.



Figur 13-3. Bild från tillverkning av buffertringar.



Figur 13-4. Schematisk beskrivning av tillverkningsprocess för buffertblock. Bilden beskriver bentonitens flöde från vänstra hörnet i processen: från silo till blandare, transport och fyllning av pressform, transport till press och uttransport av färdigt block.

Program

Tester av blockpressning i liten skala som resulterar i block som inte behöver bearbetas genomförs under 2013.

Utvecklingen av isostatisk pressning bedrivs av Posiva. De har uppskattat att de ska kunna producera testblock i full skala under 2013. Därefter ska SKB och Posiva gemensamt studera om det finns någon skillnad mellan buffertblock som tillverkats med isostatisk pressning respektive enaxlig pressning som kan påverka deras funktion i slutförvaret. Förslag på utformning av produktionsanläggning kommer att tas fram både för enaxlig pressning och isostatpressning. Dessa kommer också att utgöra underlag för ett val av produktionsmetod. Valet av produktionsmetod är planerat att ske under 2014.

Kompakteringsegenskaperna hos bentonitmaterialet har visat sig variera mellan leveranser. Materialet (MX-80) som har använts under 2012 är betydligt mer lättkompakterat än bentonit från tidigare leveranser och bulkdensiteten har ökat. SKB kommer att utreda vad detta beror på.

13.4.2 Produktion av återfyllningsblock

Nuläge

Ett stort antal block med den storlek som kommer att användas vid installationsförsök i Äspö-laboratoriet har tillverkats. I dessa tillverkningsförsök har olika vattenkvoter, presstryck och leror testats. I vissa tillverkningar med grovkornigt material har spröda block erhållits. Det kommer därför att undersökas hur granulstorleksfördelningen och andra materialparametrar påverkar blockkvaliteten.

Program

Tillverkningen har hittills skett med manuell hantering, vilket går långsamt och begränsar produktionen. För att kunna tillverka större mängder block för de storskaliga försöken krävs att processen automatiseras. Automatisering innebär att den blir lik den tänkta produktionen i en framtida produktionsbyggnad. Detta ger erfarenhet som gör det möjligt att bedöma vilka problem som kan ske i en automatiserad produktion samt vilka kapaciteter man kan förvänta sig. Produktionen av de cirka 400 ton återfyllningsblock som planeras för de fullskaliga återfyllningstesterna, kommer även att ge information om vilka statistiska variationer i dimensioner och densitet man kan förvänta sig. Ett förslag på de maskiner som behövs för att producera block och pelletar för slutförvaret har tagits fram. Dessa maskiner är kommersiellt tillgängliga och bedöms ha tillräcklig kapacitet. För den kommande utformningen av produktionsanläggningen kommer tillförlitlighet och förmåga att uppfylla krav på toleranser och kapacitet att vara viktiga utvärderingsparametrar.

13.4.3 Produktion av pelletar för buffert och återfyllning

Nuläge

För återfyllningen har arbete för att ta fram en pelletfyllning med god vattenupptagningsförmåga genomförts. Det har visat sig att extruderade pelletar har fungerat bäst för återfyllningen.

När det gäller bufferten används rullkompakterade pelletar, men ingen särskild anpassning har gjorts för denna tillämpning. Arbete pågår med att undersöka hur de olika typerna av pelletar beter sig i spalten mellan berg och buffert under tidig vattenmättnad.

I Bentonitlaboratoriet har extruderade pelletar producerats i en inhyrd maskin, se figur 13-5. När det gäller produktion av rullkompakterade pelletar har ett mindre antal tillverkningstester gjorts.



Figur 13-5. Tillverkning av extruderade pelletar i Bentonitlaboratoriet på Äspö.

Program

SKB planerar att köpa in en pelletpress till Bentonitlaboratoriet för tillverkning av pelletar till storskaliga försök. Arbeta för att utforma buffertpelletarna för att på ett bra sätt möta uppställda krav kommer att genomföras inom kommande Fud-period.

13.5 Hantering och transport av buffert och återfyllning

Transport av bentonit för buffert och återfyllning från gruva till deponeringshål och deponeringstunnel beskrivs i SKB (2010f, g). De utrustningar som kräver särskilda utvecklingsinsatser beskrivs under avsnitt 15.2 Tekniska system, Nuläge och program.

Krav för hantering av blocken samt på kapacitet i transportsystemet kommer också att preciseras. SKB kommer att använda resultaten som underlag vid sammanställning av en kvalitetsplan för buffert och återfyllning.

Hur länge återfyllningskomponenter och buffertkomponenter kan lagras utan emballage vid olika betingelser behöver undersökas framöver, liksom vilket emballage som är lämpligast ur hanterings- och lagringssynpunkt vid längre förvaring.

13.6 Installation av buffert och återfyllning

13.6.1 Installation av buffert

SKB utvecklar installationsmetoden för referensutformningen av buffert, men driver också utvecklingsarbete för alternativa installationsmetoder. Brytningen av yttre sektionen av Prototypförvaret i Äspölaboratoriet kommer också att ge underlag för att förbättra installationsmetoden.

Nuläge

Inom utveckling av vald referensutformning pågår tester av viktiga komponenter relaterade till installationen av bufferten.

Ett buffertskydd ska enligt referensutformningen användas under installationen av bufferten. Skyddet tas bort innan den yttre spalten fylls med pelletar och tunneln över deponeringshålet återfylls. Detta innebär att vissa deponeringshål kommer att stå med installerad kapsel och buffert med ett buffertskydd i upp till tre månader. Under den tiden kan en viss omfördelning av vatten i buffertblocken ske, vilket kan medföra att blocken spricker. Tidigare skalförsök har genomförts antingen med det förväntade temperaturfallet över buffertblocken eller med den förväntade temperaturgradienten. Målet med dessa undersökningar är att genomföra tester med fullskaliga buffertblock och med förväntat temperaturfall över bentoniten för att kunna studera eventuella effekter på bufferten.

Efter att buffertskyddet har tagits bort ska den yttre spalten mellan buffertblock och deponeringshållets vägg fyllas med pelletar. Därefter kommer bufferten att ta upp vatten från omgivande berg. Tidigare utförda undersökningar visar att deformationer (hävning av buffertblocken) uppstår under dessa betingelser (Sandén och Börgesson 2010). De utförda försöken visar att de uppkomna deformationerna beror på inflödes hastigheten av vatten samt typ av buffertblock och pelletar. De tidigare försöken var gjorda med kompakterade pelletar av bentonitmaterialet MX-80 och med block som var enaxligt kompakterade. Målet med de nya försöken, se figur 13-6, är att studera hävningen av buffertblock och pelletar då andra typer av pelletar används (extruderade pelletar). Försök kommer också att utföras med buffertblock som är kompakterade isostatiskt. Försöken ska ytterst ge information om eventuell erosion och hävning av buffertblocken under den period då den yttre spalten är fylld med pelletar, men återfyllningen över bufferthålet ännu inte är installerad.

Vidareutveckling av bottenplatta, buffertskydd, länshållningssystem och klimatlock för installationen av bufferten pågår. Utrustning för buffertinstallation har vidareutvecklats och testats i Bentonitlaboratoriet, se avsnitt 15.2.4 Transportsystemet för buffert- och återfyllnadsmaterial.



Figur 13-6. *Försöksupställning för test av buffertens hävning. Bilden till vänster visar en översikt över testupställningen. Övre högra bilden visar bentonitblock och pelletar vid start av testet och nedre högra bilden är från brytningen av testet.*

Alternativa lösningar för utformning och installation av bufferten utvecklas. Detta görs för att ge en anpassad utformning av bufferten ur ett produktionsperspektiv, utan att menligt påverka förvarets långsiktiga funktion. Möjligheten att installera buffert och kapsel utan buffertskydd samt att motverka spjälkning har varit fokusområden. Detta arbete är under slutrapportering.

Ett stort antal alternativ för utformning och installation har identifierats. Vid en första gallring sorterades orealistiska alternativ bort och kvarvarande utreddes vidare. I de preliminära slutsatserna från detta arbete konstateras att det finns två alternativ med goda förutsättningar för produktionsanpassning.

Program

Det kommer att utredas om utformningen av bottenplattan kan förbättras för att ge en enklare installation. Som en del av detta utreds om det är möjligt att utforma bottenplattan helt i koppar för att därmed undvika att använda betong. Buffertskydd och klimatlock utvecklas vidare för att åstadkomma en produktionsanpassad lösning. I detta inkluderas tester i full skala i Bentonitlaboratoriet.

Inom utveckling av alternativa lösningar är det ena alternativet att belägga blocken med ett tunt skikt av lämpligt material för att skydda mot fuktupptag och uttorkning. Det andra alternativet är att med hjälp av en avfuktare styra fuktigheten i deponeringshålen. Dessa två metoder kommer att utredas närmare i den fortsatta utvecklingen för att kunna jämföras med nuvarande referensutformning.

13.6.2 Installation av återfyllning i deponeringstunnlar

Nuläge

Ett koncept för installation av återfyllning har valts där installation av pelletbädd och blockstapel sker i korta sektioner. För varje sektion läggs en bädd av pelletar ut på tunnelgolvet och därefter installeras återfyllningsblock med hjälp av en industrirobot. Slutligen installeras pelletar i spalterna mellan blockstapeln och tunnelväggen.

I det pågående arbetet med detaljering av återfyllningens utformning utvärderas kravet på packning och täthet. Kravet påverkas bland annat av andelen överberg, bentonitens halt av montmorillonit samt torrdensiteten hos block och pelletar.

En industrirobot för installation av återfyllningsblock och pelletar har köpts in och blockstaplningstester pågår i Åspölaboratoriet. Ett försök då roboten ska användas för installation av återfyllningsblock och pelletar är planerat till början av 2014. I den vidareutvecklade referensutformningen utreds en okompakterad pelletbädd. För att verifiera att den bädden utgör ett tillräckligt stabilt underlag för blockstapling har bäddtester genomförts där betongblock staplats på pelletbädden. Testerna visar att en okompakterad bädd utgör ett stabilt underlag för blockstapling även över deponeringshålets avfasning och vid inflöde av vatten till tunneln (Johnsson 2011).

Vatteninflöde under installation kan orsaka problem. Pelletfyllningens huvudsakliga uppgift är att absorbera inläckande vatten och på så sätt skydda blocken under installation. Pelletar installeras så snart som möjligt efter att en sektion med block installerats i deponeringstunneln. Installationstester av pelletar i full skala för att undersöka pelletens vattenlagringsförmåga och uppskatta tiden till vatteninflöde vid pelletfronten under installation pågår.

Vid installation av pelletar i spalten mellan blockstapel och tunnelväggen har pelletar sprutats in med en betongspruta, vilket har resulterat i att delar av materialet krossas och damm uppstår.

Vid stora vatteninflöden kan andra metoder än pelletar för hantering av vatteninflödet behövas. Användning av geotextiler för att sprida ett punktinflöde av vatten över en större yta av pelletar undersöks.

Optimering av pelletfyllning

Sedan Fud-program 2010 har arbete med optimering av pelletfyllningens egenskaper skett, främst med avseende på vattenlagringskapacitet och erosion. Olika material och olika typer av pelletar (extruderade, kompakterade och granuler) har studerats. Erosionsegenskaper och vattenlagrande egenskaper skiljer sig mellan både material och pellettyper.

Av de testade pellettyperna rekommenderas extruderade pelletar med en diameter på sex millimeter då dessa hade bäst erosionsegenskaper och vattenlagringsförmåga (Andersson och Sandén 2012), se figur 13-7.

I gällande referensutformning sprutas pelletarna in i spalterna mellan blockstapeln och tunnelväggen. Vid insprutningen skapas finfördelat material vilket kan påverka vattenlagringsförmågan negativt.



Figur 13-7. Sexmillimeters extruderade pelletar.

Installerad densitet och tunnelns geometriska konfiguration – modellering

För att förfinas återfyllningens och buffertens utformning har känslighetsanalyser genomförts. Där har analyserats hur geometri och mekaniska egenskaper för buffert och återfyllningen påverkar buffertens uppåtriktade svällning. Detta rapporteras under hösten 2013.

Program

Metoder och utrustning för installation av pelletar i spalten mellan blockstapel och tunnelvägg behöver vidareutvecklas, bland annat ska alternativ installation med inskrivning av pelletar undersökas. Påverkan på pelletarna vid installation och alternativa metoder för installation kommer att studeras vidare. Även metoder för vattenhantering kommer att studeras vidare i den fortsatta utvecklingen och testningen. Bland annat ska temporära pluggar som kan byggas upp vid stora vatteninflöden studeras.

Referensutformningen för återfyllningen kommer att vidareutvecklas i ett andra steg baserat på resultaten från pågående arbete och resultaten från försöket med staplingsroboten i Äspölaboratoriet.

13.7 Kvalitetsprogram buffert och återfyllning

SKB kommer under den kommande Fud-perioden att utreda och beskriva kvalitetsstyrning inklusive kontrollmetoder från gruva till pressning av block och pelletar. Kvalitetsstyrning och kontroll av installationen av buffert och återfyllning kommer att tas fram som en del av den fortsatta utvecklingen för buffert och återfyllning.

SKB kommer att ta fram en kontrollordning för buffert och återfyllning, detta inkluderar att beskriva:

- Vilka kontroller som ska göras.
- Var i processen kontrollerna ska genomföras.
- Hur kontrollerna ska genomföras.
- Vem som ska genomföra kontrollerna (första, andra eller tredje part).

Kontrollordning tas även fram för pluggen.

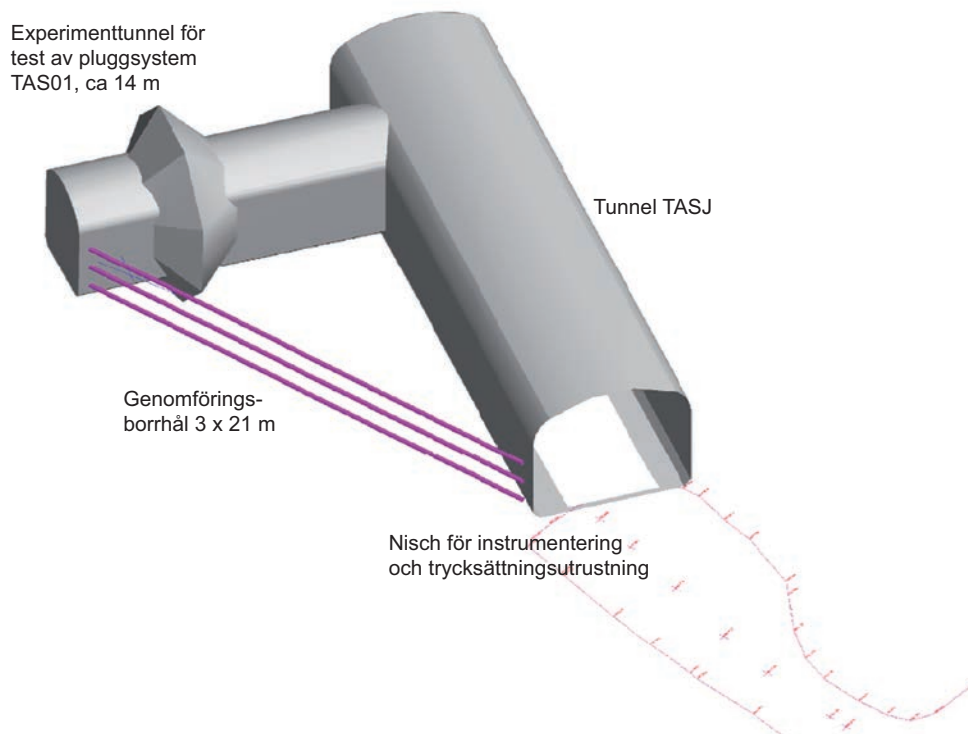
13.8 Pluggning av deponeringstunnlar

Nuläge

I Äspölaboratoriet, på 450 meters djup, genomförs ett fullskaligt test av det kompletta systemet för pluggning av deponeringstunnlar, se figur 13-8. Experimentuppställningen ingår i ett EUsamarbetsprojekt. I systemkonstruktionsfasen för pluggen har det genomförts utredningar och praktiska studier inom berg- och betongteknik samt materialtester och modelleringar av betong, bentonit och filtermaterial. Vidare uppdateras kravspecifikation, riskanalys, tekniska beskrivningar och kontrollprogram för pluggen. Målet för den fortsatta utvecklingen är en färdig systemkonstruktion av pluggen innan detaljprojektering av deponeringsområdet påbörjas.

Fullskaletest

Ett huvudmål med fullskaletestet är att övervaka vattenläckaget genom pluggen över tid (minst 36 månader). För detta syfte har ett mätsystem för kontroll av läckaget utvecklats och vattnet kommer att däckas upp inom en tät atmosfär (plastduk) precis nedströms betongkupolen och ledas med självfall till en upphängd våg för on-line registrering av vattenflödet. Experimentet trycksätts artificiellt med vatten i återfyllningen och filtret bakom pluggen. Trycket höjs stegvis upp till sju megapascal för själva täthetstestet och upp till tio megapascal för ett verifierande hållfasthetstest. Installationen av fullskaletestet illustreras i figur 13-9 och figur 13-10.



Figur 13-8. 3D-vy av experimentområdet för fullskaligt test av det kompletta pluggsystemet i Äspölaboratoriet på 450 meters djup. I tre genomföringsborrhål leds givarkablage och trycksättningsrör till instrumentnischen.



Figur 13-9. Detaljfoto från installationen av fullskaligt test av det kompletta pluggsystemet. Bilden visar (från vänster) filter av lecabalkar och makadam, dräneringsrör (avluftning), geotextil, bentonittätning med MX-80-lera (block och pelletar) samt betongbalkar. Alla givarkablar leds i stålrör på experimentets trycksida.



Figur 13-10. Installation av betongbalkar som utgör inre formvägg för betongkupolen i ett fullskaligt test av det kompletta pluggsystemet. Bakom betongbalkarna installeras bentonittätning, makadam, filter och givare.

Experimentet monteras med totalt cirka 100 givare. Drygt hälften av givarna mäter betongkupolens spänningsprestanda, temperaturer och rörelser. Resterande andel givare övervakar vattentryck, totaltryck, relativ fuktighet (RH) och rörelser i bentonittätningen, filtret och den avslutande återfyllningen.

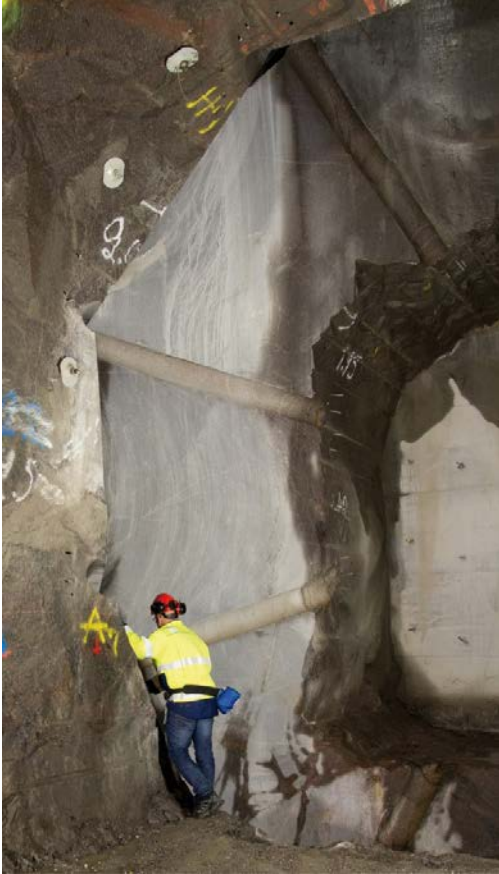
Den huvudsakliga trycksättningen börjar efter att kylning och kontaktinjektering har utförts. Kontaktinjekteringen utförs när betongkupolen har härdat och krympt färdigt till cirka 99 procent, ungefär 90 dagar efter gjutningen. Hela testuppställningen och trycksättningsprogrammet har föregåtts av en omfattande projektering, som i huvudsak har haft målbilden att spegla de reella förhållanden som förväntas i Kärnbränsleförvaret.

Utredningarna från första delen av systemkonstruktionen och erfarenheter från fullskaletestet, kommer att avrapporteras i slutet av 2014. Moniteringen av fullskaletestet fortsätter åtminstone till 2016.

Berguttag för pluggens slits

Pluggar ska placeras i områden med bra och homogent berg, vilket innebär att inga betydande deformationer kan förväntas i betongkupolens anfang med anledning av trycklasterna. Kravbilden för slitsens geometrier och dess eventuella behov av plana motgjutningsytor kommer att utredas vidare. Syftet är att utesluta spänningsrelaterade betongproblem från till exempel vidhäftning mellan betong och berg samt att kunna garantera bra förutsättningar för kontaktinjektering.

I det fullskaliga berguttaget som gjordes för fullskaletestet i Äspölaboratoriet 2012 har slitsytorna utförts med vadersågning, se figur 13-11 och figur 13-12. Följden är att slitsen har ett kantigt utförande (oktagonalt) i stället för konisk, motsvarande drygt 8,5 meter i diameter. Känslighetsanalyser har utförts för att styrka att olika geometrier inte innebär problem för betongkupolens bärförmåga. Ytterligare en aspekt som studeras praktiskt är påverkan på betongpluggen av bergspänningar på slutförvarsdjupet.



Figur 13-11. Inspektion av vadersågad slits för betongkupolen i fullskaleexperimentet. Vänster sida av experimenttunnel TAS01 (se figur 13-8).



Figur 13-12. Vadersågad slits för betongkupolen i fullskaleexperimentet. Höger sida av TAS01 (se figur 13-8). Bergtagget genomfördes 2012.

Tester av låg-pH-betong

När det gäller låg-pH-betongen B200 (Vogt et al. 2009) är vissa parametrar okända och en del data kan i nuläget klassas som osäkra, främst avseende långtidsegenskaper hos betongmaterialet. Det kommer att ta flera år innan dessa frågor kan besvaras. Den fullskaliga gjutningen som görs under 2013 bedöms vara nödvändig för att slutligen kunna verifiera antaganden och genomförda numeriska simuleringar.

Ett omfattande laboratorieprogram bedrivs med bland annat tester av låg-pH-betongens hållfasthet, krypning, krympning och vidhäftning. Ett antal större gjutningar med B200 har utförts vid Äspö-laboratoriet under 2012 för att samla erfarenheter om hanteringsstegen vid fabrik, påverkan under transport, utförande av ankomstkontroller, pumpning från betongbil till form, betongens faktiska temperaturutveckling etc. Ett stort antal testkuber och en större monolit av B200 göts i samband med fullskaletestet för att möjliggöra framtida provtagning och uppföljning. Betongreceptet kommer att utvärderas och eventuellt modifieras som en del av den fortsatta utvecklingen och testningen av pluggen.

Modellering och tester av filter och bentonittätning

Den valda referensutförningen för återfyllningen med förkompakterade block av svällande lera medför att återfyllningen närmast pluggen kan behöva anpassas för att inte svälltrycket mot pluggen ska bli allt för högt eller för varierande. Den avslutande återfyllningen ska reducera svälltrycket från återfyllningen ner till cirka två megapascal. En anledning till detta är att betongkupolen därigenom kan visas uppfylla högsta säkerhetsklass för betongkonstruktioner. Den avslutande återfyllningen kan utgöras antingen av enbart pelletar eller av återfyllningsblock med en lägre densitet.

Ett laboratorieprogram har genomförts för att verifiera godtagbara materialtyper för filtret (naturliga och tillverkade material) och för tätningen (block respektive pelletar). Vidare har analytiska och numeriska modelleringar utförts i designsyfte för att till exempel fastställa lämplig tjocklek på materialskikten och förutse vilka kompressioner och rörelser som kan förväntas i pluggsystemet. När det gäller filtermaterial visar laboratorieförsöken att makadam med storleken 2–4 millimeter är det bästa filtermaterialet, men även lecablock fungerar bra ur filtersynpunkt. I filtret i fullskaletestet ingår därför både makadam (30 cm) och lecabalkar (30 cm). Med stöd av laboratorieförsöken rekommenderas att bentonittätningen bakom betongkupolen bör bestå av högkvalitativ bentonitlera. Denna liknar buffertens bentonitmaterial MX-80, men har egenskaper som anpassar det totala svälltrycket för pluggsystemet, inräknat viss kompression av pelletar och filter, till cirka två megapascal. I fullskaletestet utgörs pluggens bentonittätning av MX-80-block (50 cm) omgivna av MX-80-pelletar i periferi mot berget.

Parallellt med fullskaletestet genomförs ett långtidstest i en skalmodell som har byggts upp i laboriemiljö. Ett flertal korttidsförsök i skalmodellen utfördes som en del i projekteringen och utvecklingen av trycksättnings- och bevättningsprocessen för fullskaletestet.

Program

Resultaten av pågående laborietester och fullskaletestet ligger till grund för bedömningen av omfattningen av pluggens utvecklingsbehov på längre sikt. Materialtyper och materialavskiljare, detaljmått för komponenter, infästningar och anslutningar mot berget, blandning, hantering och kontroller av betong samt kontaktinjektering är exempel på områden som möjligen kan optimeras ytterligare.

Fullskaletestet ska enligt planen brytas efter minst tre års dataövervakning, det vill säga tidigast under 2016. Inför brytningen kommer en detaljplanering att utföras för att specificera omfattningen av de provtagningar och kontroller som ska göras under återtaget av pluggen. Det kan bland annat vara intressant att verifiera givardata genom att ta prover på bentonitleran och eventuellt också i betongkupolen om intressanta händelser har noterats under testperioden. Vidare kan man undersöka om materialkompressionerna är som väntat och detaljstudera gränssnitten mot berg, om kontaktinjekteringen har utförts med förväntat resultat och om leran har tätat som avsett.

Den fortsatta betongutvecklingen för pluggen i deponeringstunneln inriktas på tre teman:

- Rationell och kostnadseffektiv produktion av oarmerade barriärkonstruktioner utförda med låg-pH-betong. Temat omfattar erfarenheter från fullskaletest och underlag om den unga betongens egenskaper.
- Utvecklad säkerhetsfilosofi för oarmerade barriärkonstruktioner utförda med låg-pH-betong relaterat till påverkan av långtidslaster. Temat omfattar pågående krymp- och krypförsök samt driftförsök på fullskaletestet inklusive tillhörande materialförsök på monolitgjutning. Beroende på resultat kan det eventuellt bli aktuellt med framtida belastningstest av valvkupor i liten skala kombinerat med fler materialförsök.
- Oarmerade barriärkonstruktioner av låg-pH-betong som temporära konstruktioner i 100 år – långtidsegenskaper, beständighet och eventuellt underhållsbehov. Temat omfattar aspekter som betongens krympning och krypning sammankopplat med bergets krypning och de temperaturförändringar som uppstår med tiden. Fortsatt utveckling av pluggen enligt dessa aspekter kopplas ihop med tidigare gjorda försök. Temat omfattar även frågor som effekter av betongens nedbrytning (denna del samordnas med övrig låg-pH-betongutveckling inom SKB).

SKB deltar under 2013–2015 i ett EU-projekt, Full Scale Demonstration of Plugs and Seals (DOPAS) tillsammans med 14 organisationer (Posiva, Andra, Nagra, Rawra med flera). SKB:s fullskaletest ingår i samverkansarbetet som ett av fem storskaliga experiment. SKB är även sammanhållande för arbetspaketet med att sammanställa konstruktionsförutsättningar och andra krav för pluggar.

För SKB är det givande att följa den internationella utvecklingen med att identifiera alternativa metoder att plugga deponeringstunnlar, eftersom bergegenskaper och hydrologiska förhållanden varierar i Kärnbränsleförvaret. Även om pluggen i grunden konstrueras för de strängaste av de dimensionerande villkoren så är det inte helt givet att en generisk design av pluggen alltid är den bästa lösningen. Till exempel kan man sträva efter att bygga pluggen utan filter och tätning i mycket torra deponeringstunnlar. SKB har för avsikt att följa, och till viss del delta i, Posivas fullskaliga pluggtest i Onkalo under 2013–2015. Experimentet ingår som ett av de fem storskaliga experimenten i EU-projektet.

Gränssnittet mot återfyllningen behöver utredas ytterligare, beroende på pluggens position kommer återfyllningsstapeln att ansluta på varierande sätt. Minst ett fullskaligt installationstest behöver utföras med återfyllning och plugg i en sekvens.

För att kunna göra berguttaget för betongkupolens slits behövs utrustning som bormaskin, borrhjula och wiresåg eller liknande. Dessa utgörs av standardprodukter, men behov av framtida specialutveckling kan inte uteslutas för att hitta ett produktionsanpassat utförande i relation till aktuella bergspänningar, etc.

Pluggarna är en tänkbar framtida kontrollpunkt i Kärnbränsleförvaret. Fram till dess att bentonittätningen är fullt vattenmättad bör man registrera vattenflödet genom pluggen. Ett mätsystem liknande det som används i fullskalförsöket kan troligen utvecklas ändamålsenligt för uppgiften. När bentonittätningen är vattenmättad kan dränagerören från filtret slutligen pluggas igen från utsidan av betongkupolen.

Inom den kommande teknikutvecklingen kommer även underlag att tas fram för att bestämma om SKB ska bygga en egen betongstation eller om betongen kan levereras från existerande kommersiella betongstationer.

13.9 Förslutning av Kärnbränsleförvaret

Nuläge

Baserat på slutsatserna i SR-Site genomfördes känslighetsanalyser där den hydrauliska konduktiviteten i schakt och ramp samt den störda zonen varierades (Luterkort et al. 2012). Nivån för den kompetenta förslutningen som består av block och pelletter av bentonit varierades också.

Modelleringen bygger på de hydrogeologiska modeller som utvecklades för Forsmark inom SR-Site.

I den hydrogeologiska grundvattenflödesmodellen har två olika klimatsituationer studerats: den tempererade perioden strax efter förslutning av förvaret, samt glaciala förhållanden då isfronten vid en inlandsis är belägen strax ovanför förvaret. Situationen då klimatet är tempererat tros vara det mest gynnsamma scenariot, medan istiden representerar det värsta tänkbara scenariot.

Resultaten från modelleringen jämfört med resultaten från SR-Site visar att egenskaperna hos tätningen i rampen, schakten och sprängskadezonen, EDZ, har en liten påverkan på den långsiktiga säkerheten.

Modelleringen visar att de få partiklar som eventuellt lämnar ett deponeringshål, främst når ytan via deformationszoner och endast i begränsad omfattning via ramp och schakt. Liknande resultat gäller även för undersökningsborrhål. Det är först när den hydrauliska konduktiviteten är större än 10^{-6} m/s som någon effekt kan ses på ramp och schakt. Inte heller påverkas nedträngningen av syre till förvaret i någon nämnvärd omfattning (Luterkort et al. 2012).

De analyser och bedömningar som har utförts visar att referensutformningen för förslutningen kan förenklas och att tätningen kan göras kostnadseffektivare utan att den långsiktiga säkerheten påverkas menligt (Luterkort et al. 2012). Detta gör det möjligt att förenkla utformningen så att rampen fylls med svällande bentonitlera i form av block och pelletar (eller endast pelletar) från förvarsdjup och 100 meter upp. Därefter fylls makadam eller liknande upp till 50 meter under marknivå. De sista 50 meterna upp till marknivå fylls igen med stenblock av varierande storlek. Fyllningen injiceras sedan med betonginjekteringsbruk. Schakten fylls med bergkross, optimerad för låg hydraulisk konduktivitet, från förvarsnivå till 50 meter under marknivå. De sista meterna försluts på samma sätt som rampen.

Detta alternativ bedöms uppfylla kriterierna för långsiktig säkerhet. Det är också ett kostnadseffektivt alternativ, som kräver mindre transporter vilket i sin tur innebär lägre miljöpåverkan. Installation av bergkross i stället för svällande bentonitlera i schakten bedöms vara mer robust och medföra lägre risker i produktion och installation. Ytterligare studier och tester måste göras för att verifiera detta alternativ.

Baserat på de genomförda analyserna har SKB beslutat att ändra nivån för kompetent förslutning från 100 meter under marknivå till 100 meter ovanför slutförvarsnivå. Inga andra förändringar av referensutformningen har gjorts.

Vidare visar resultaten av analyser och utvärderingar att konstruktionsförutsättningarna för tätning av undersökningsborrhål kan förenklas. Följande föreslås som ny konstruktionsförutsättning. Den resulterande hydrauliska konduktiviteten över längden av borrhålet ska vara lägre än 10^{-6} m/s (Luterkort et al. 2012).

Program

Resultaten från analyserna enligt ovan ger inte underlag för att föreslå en ny referensutformning för tätning av undersökningsborrhål. Alternativ som utretts är till exempel att fylla undersökningsborrhål med krossat berg som har optimerats för att ge låg hydraulisk konduktivitet. Dessa alternativ anses inte vara lika tekniskt mogna och beprövade som den nuvarande referensutformningen. Ytterligare studier och tester måste genomföras innan referensutformningen kan ändras.

13.10 Integrationstester

Komponenter, metoder och utrustning kommer att testas i steg. Detta görs som en del av den iterativa utvecklingen av referensutformningen av buffert, återfyllning och plugg med utveckling av installationsutrustning samt demonstration och verifiering av installationsprocessen. SKB har gått igenom ett antal cykler i denna successiva utveckling, från testerna i Stripa gruva och vidare till tester i Äspölaboratoriet och Bentonitlaboratoriet. De i ansökan beskrivna referensutformningarna utgör basen för kommande förfining av utformningen samt utveckling, produktionsanpassning och

implementering av installationsprocessen. Installationen av buffert, återfyllning och plugg testas först separat. Detta kan leda till att utformningen förbättras eller beskrivs mer detaljerat, vilket i sin tur ger bättre beskrivning av de krav som ställs på berguttag, installationsutrustning och andra barriärer. I nästa steg testas installation av buffert och återfyllning integrerat med vidareutvecklad utrustning och med nya specifikationer för berguttag. Integrationstester har följande huvudsakliga syften:

- Integrera olika utrustningar och tekniska system.
- Testa installationen av barriärerna för att ge input till vidare utveckling.
- Ge underlag till verifieringen av att installationen resulterar i ett initialtillstånd enligt uppställda krav. Detta inkluderar metoder för tillverkning, installation och kontroll.

Efter detta sker en utvärdering om utformning av buffert, återfyllning och plugg kan förbättras ytterligare innan ett test genomförs där även pluggen inkluderas.

13.11 Prototypförvaret

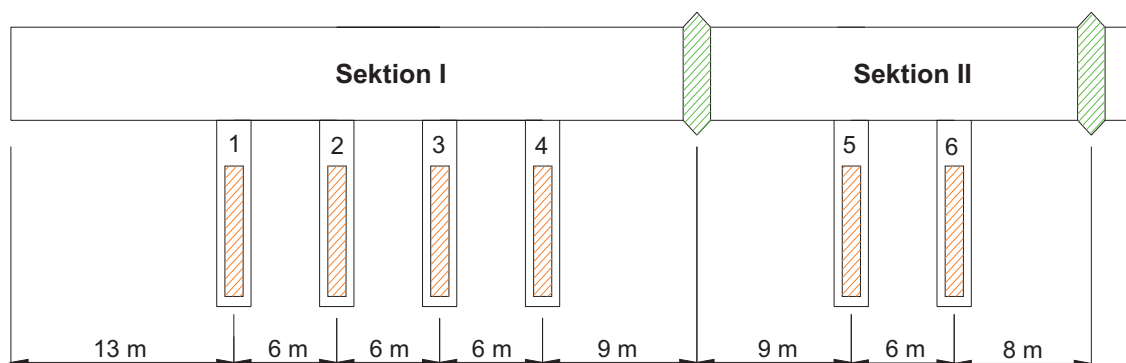
Det största storskaliga försöket i Äspölaboratoriet, Prototypförvaret (Börgesson et al. 2002, Johannesson et al. 2004) består av totalt sex fullskaliga deponeringshåll med kapslar och buffert i en deponeringstunnel som återfyllts med en blandning av bentonit (30 viktprocent) och krossat berg (70 viktprocent). Det övergripande målet med Prototypförvaret är att testa och demonstrera den integrerade funktionen av delkomponenter i ett slutförvar, under realistiska förhållanden och i full skala. Data från försöket jämförs med modellberäknade prognoser. Försöket, som installerades under 2001 och 2003, är indelat i två fristående sektioner där varje sektion förslöts med en valvplugg, se figur 13-13.

SKB deltar dessutom, tillsammans med Posiva, Ciemat och Nagra, i ett prototypförsök med värmare enligt spansk referensutformning. Det prototypförsöket drivs sedan 1997 i Nagra's testanläggning i Grimsel i Schweiz. Den yttre sektionen bröts 2002 och den inre sektionen planeras att brytas 2015.

Nuläge

Brytning av den yttre sektionen

I slutet av 2010 bröts pluggen till den yttre sektionen av Prototypförvaret och under 2011 återtog återfyllningen samt buffert och kapslar i de två deponeringshålen. Cirka 9 700 prover togs på bentonitmaterialet för att på plats, i Äspölaboratoriets geolaboratorium, kunna bestämma densitet och vattenkvot. Utöver detta togs ett stort antal prover för laboratorieändamål där hydromekaniska, mineralogiska/kemiska och mikrobiologiska egenskaper studerades under 2012. Därtill utfördes bergundersökningar, givarkontroller, kapselstudier och modelleringar.



Figur 13-13. Schematisk bild av Prototypförvaret vid Äspölaboratoriet. Den yttre sektionen (II) har brutits varvid buffert och kapslar i de två fullskaliga deponeringshålen (nr 5 och 6) har återtagits.

Resultat

Under 2013 sammanställs och utvärderas resultaten från fältarbetet och laboratorieprogrammet för den yttre sektionen. Resultaten avrapporteras i slutet av 2013 i en teknisk huvudrapport med referenser till ett flertal nya publika underlagsrapporter.

Följande preliminära slutsatser kan dras från brytningen av Prototypförvaret och analyserna av återfyllning och buffert:

- Återfyllningen var vid utgrävningen helt vattenmättad i alla delar av tunneln.
- Inga tecken på piping eller erosion av återfyllningen observerades vid utgrävningen.
- Variationerna i torrdensiteten vid installationen av återfyllningen, beroende på den använda installationstekniken, kunde fortfarande observeras efter mer än åtta års naturlig bevätning. Det initiala mellanrummet mellan kapslarna och buffertblocken fanns som väntat inte kvar vid återtaget.
- Uppåtriktad svällning av bufferten har skett under vattenuptagningen, vilket resulterar i minskad densitet av bufferten i den övre delen av deponeringshålen.
- Variationer i vattenkvot och torrdensitet observerades mellan olika delar av bufferten, troligen orsakade av variationer i vatteninflödet till de två deponeringshålen.
- Bufferten i de två deponeringshålen var inte vattenmättad i alla delar efter åtta års naturlig bevätning. En god kontakt mellan buffert och berg observerades vid brytningen. Redovisning av densitetsfördelning/vattenmättnadsgrad kommer att göras i rapporteringen av brytningen.
- Mätningar av hydraulisk konduktivitet och svälltryck för buffertmaterial taget från deponeringshålen har jämförts med motsvarande tester för referensmaterial. Dessa undersökningar tyder preliminärt på små förändringar i hydraulisk konduktivitet och svälltryck för buffertmaterialet efter åtta års exponering i fält.
- De mekaniska egenskaperna för buffertmaterialet har studerats med såväl triaxialförsök som med enaxliga tryckförsök. Även i dessa försök har resultat från fältexponerat material jämförts med försök gjorda på referensmaterial. Jämförelserna indikerar att det är små skillnader i mekaniska egenskaper mellan fältexponerat material och referensmaterial.
- Studier av berget runt deponeringshålen indikerar att ingen skada har skett på berget, trots att knäppningar i berget noterades genom monitoring med Accoustic Emission (AE) under nästan hela driftfasen av den yttre sektionen. Dessa registrerade knäppningar i berget har lågt energiinnehåll och beror troligen på viss mikrosprickbildning (mineralkornskala). Resultaten styrker tidigare studier om hur bergets egenskaper påverkas i närheten av ett uppvärmt deponeringshål.

Funktionsprinciper för mätinstrument

En generell slutsats av den kontinuerliga datauppföljningen är att mätsystemen tycks fungera bra.

I Prototypförvarets återfyllning och buffert mäts temperatur, totaltryck, porvattentryck och vatteninnehåll (Collin och Börgesson 2001).

Temperaturen i Prototypförvaret mäts med följande tre metoder:

1. Termoelement.
2. Fiberoptik.
3. Resistivitet.

Totaltryck och porvattentryck mäts i Prototypförvaret med följande två metoder:

1. Vibrerande sträng.
2. Piezoresistiva sensorer.

Vatteninnehållet i återfyllning och buffert mäts med följande tre metoder i Prototypförvaret:

1. Kapacitiva givare.
2. Psychrometer.
3. Resistivitetsmätningar.

Av total 363 installerade givare (med undantag av vattentrycksmätare i berget) i den kvarvarande inre sektionen (Sektion 1) var det 261 som inte fungerade (Goudarzi 2012). Många av dessa (64 stycken) är mätare av relativ fuktighet, RH-mätare, som slutar fungera vid vattenmättnad.

Av 394 givare i den yttre sektionen (med undantag av vattentrycksmätare i berget) fungerade inte 142 vid återtaget. Dessutom hade en del psychrometrar (21 stycken) placerade i återfyllningen slutat att ge relevanta värden på grund av att återfyllningen var vattenmättad.

Insamling av givare var inte prioriterat vid brytningen av Prototypförvarets yttre sektion då en kontinuerlig framdrift i provtagningen bedömdes som viktigare. De givare som trots allt har kunnat omhändertas vid utgrävningen, och som inte har bedömts skadade av grävmaskin, borrrutrustning etc har samlats in för försök till efterkontroll av tillförlitlighet till data. Erfarenheterna redovisas i slutrapporteringen 2013.

En del givare i Prototypförvaret har under bevättningsfasen slutat fungera på grund av vattenläckage in till givaren. En möjlig orsak till läckage är mekanisk påverkan på givare och tuber under installation och bevätning.

Korrosion verkar inte ha förekommit på givare och rör då titan användes i de flesta fall. Inte heller för termoelementen som tillverkats i cuprinickel har någon korrosion observerats.

Kablarna till värmarna i kapslarna konstaterades vid brytningen av den yttre sektionen ha skadats mekaniskt till följd av buffertens svällning. Vidare tycks den använda kabeln inte ha klarat den miljö med hög temperatur och hög fuktighet som rådde närmast kapseln.

Stora problem har observerats med givare installerade i berget för mätning av spänningar och töjning kring Prototypförvaret. I princip är inga mätningar av denna typ tillförlitliga.

Program

Sektion I av Prototypförvaret ska vara i drift ytterligare cirka åtta år enligt de ursprungliga planerna. Tidpunkten för brytningen motiverades med att resultaten ska användas som underlag för ansökan om driftsättning av Kärnbränsleförvaret.

Resultaten från brytningen av den yttre sektionen, tillsammans med erfarenheter från pågående utvecklingsprojekt, kommer att ligga till grund för planeringen av provtagning och laboratorieprogram för brytning av den inre sektionen.

14 Teknikutveckling berg

Kapitlet om teknikutveckling berg omfattar detaljundersökningar, projektering, byggande och underhåll av Kärnbränsleförvarets undermarksutrymmen. Utvecklingsarbetet spänner över ett brett fält och avser metoder för undersökningar och modellering. Vidare ingår bergbyggande, inklusive tätning- och förstärkningsåtgärder samt utveckling av specialutrustningar med fokus på de bergförhållanden som råder i Forsmark.

Verksamheten utgår från kraven på förvarets bergutrymmen med avseende på långsiktig säkerhet, arbetarskydd och effektivitet samt gällande referensutformning. Specifikationer för utförandet av undersökningar, projektering och byggande tas fram för att kunna verifiera krav och dokumentera initialtillstånd för berget. Detaljundersökningarna anpassas till en integrerad del av projekteringsmetodik och byggprocessen (berguttag, tätning och förstärkning av berget).

En parallell aktivitet är dokumentationen av utförd projektering och byggande. Detta omfattar dokumentation av platsförhållanden, hur anläggningen anpassats till platsen (relationshandlingar) samt hur anläggningens olika delar uppförts (kvalitetsdokumentation).

14.1 Krav och förutsättningar

I Fud-program 2010 redovisade SKB att arbete pågick med att precisera konstruktionsförutsättningar för bergutrymmena. Resultatet av detta arbete presenterades i berglinjerapporten (SKB 2010i, kapitel 2) som ingår i ansökningarna för Kärnbränsleförvaret. De viktigaste av de där redovisade och nu gällande konstruktionsförutsättningarna för bergutrymmena är:

- Deponeringshålen ska placeras mer än 100 meter från deformationszoner med en spårlängd vid markytan på mer än tre kilometer.
- Deponeringshål ska, så långt som rimligen är möjligt, väljas så att de inte utsätts för kraftigare skjuvning än vad kapseln kan motstå. För att uppnå detta ska EFPC tillämpas vid valet av deponeringspositioner, se avsnitt 14.4.3 Detaljundersökningar, Stora sprickor.
- Avståndet mellan deponeringshålen ska väljas så att det för angivna egenskaper hos bränsle, kapsel och buffert resulterar i en temperatur i bufferten som inte överstiger 100 °C.
- Den totala vattenvolymen som strömmar in i ett deponeringshål, från det att bufferten exponeras för inströmmande vatten till dess att den är mättad, ska vara begränsad.
- Innan en kapsel placeras i ett deponeringshål måste den sammanhängande effektiva transmissiviteten i deponeringshålets vägg vara mindre än 10^{-10} kvadratmeter per sekund (m^2/s). Transmissiviteten ska då vara integrerad utefter hela längden av deponeringshålets vägg och medelvärdesbildad runt hålet.
- Sprängskador ska begränsas och får inte leda till en sammanhängande effektiv transmissivitet som är högre än $10^{-8} m^2/s$. Detta gäller utefter minst 20–30 meter av deponeringstunneln och som medelvärdesbildat över tunnelsulan.
- Under toppförslutningens nivå måste den integrerade effektiva konnekterade hydrauliska konduktiviteten vara lägre än 10^{-8} meter per sekund (m/s). Detta gäller återfyllningen i tunnlar, ramp och schakt och den skadade zonen som omger dem. Det här värdet måste inte upprätthållas i sektioner där exempelvis tunneln eller rampen går genom kraftigt transmissiva zoner. Det finns ingen begränsning för den hydrauliska konduktiviteten i centralområdet.
- För att buffert och återfyllning ska kunna uppfylla sina barriärfunktioner finns krav på bland annat utformningen av deponeringshål respektive deponeringstunnlar samt högsta tillåtna inflöde av vatten. Vidare finns krav på maximala vatteninflöden för stam- och transporttunnlar samt för ramp och schakt.

Konstruktionsförutsättningarna för bergutrymmena revideras som en del av den översyn som beskrivs i avsnitt 10.2.1 Konstruktionsförutsättningar. Följande konstruktionsförutsättningar planeras att revideras:

- Kraven på hur deponeringshål ska placeras med respektavstånd till deformationszoner med potential för större jordskalv kan komma att revideras baserat på resultat från pågående forskning, se avsnitt 26.8 Reaktivering – rörelse längs befintliga sprickor.
- Kravet att EFPC (se avsnitt 14.4.3) ska tillämpas vid valet av deponeringspositioner planeras att modifieras. Deponeringshål ska så långt möjligt placeras så att de inte skärs av sprickor med potential för förskjutningar som kan leda till skjuvbrott på kapseln. EFPC är ett verktyg för att identifiera sådana sprickor, men det kan ersättas eller kompletteras med andra verktyg. Till exempel gäller att ett deponeringshål kan accepteras även om det inte uppfyller EFPC. Detta kan göras om det med andra geologiska karakteriseringsmetoder går att visa att den korsande sprickan är mindre än den minsta sprickstorlek som enligt gällande jordskalvsanalys har potential för skjuvning mindre än fem centimeter.
- Kraven på tillåtna inflöden i deponeringshål för att säkerställa att inte för mycket buffertmaterial förloras på grund av kanalbildning och erosion kommer att revideras. Detta görs utifrån resultat från pågående forskning om processen för kanalbildningserosion, se avsnitt 25.5.8 Piping/erosion.
- Hydrauliskt baserade kriterier för att undvika deponeringshål med höga Darcyflöden planeras att tas fram och behöver utvecklas. Det blir sannolikt en kombination av högsta accepterade inflödes hastighet, kassering av hål med dokumenterad injektering och kassering av hål som korsas av deterministiskt modellerade konduktiva sprickor i tunnelskala.
- Kravet på inflödet till deponeringstunnlar i samband med installation och vattenmättnad av återfyllningen planeras att revideras och kopplas till vilka installationsmetoder som kan användas. Om det inte finns en godkänd installationsmetod för de specifika inflöden som råder i en specifik tunnel får denna tunnel inte användas som deponeringstunnel.
- Endast material som i kontakt med vatten genererar ett pH lägre än 11 accepteras under nivån för toppförslutningen. Alla typer av material och mängder som tillförs slutförvarsanläggningens underjordsdel måste bokföras.

14.2 Nuläge och program

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 redogjorde SKB för utvecklingsplaner avseende undersökning och karakterisering, injektering, borrhning och sprängning av bergutrymmen, bergförstärkning samt borrhning av deponeringshål. I sin granskning av programmet framförde SSM bland annat följande:

- SSM ser positivt på att SKB arbetar vidare med att utveckla projekteringsmetodikerna inklusive observationsmetoden. Detta ställer dock höga krav på kravspecifikationen för byggandet och uppföljningen av dessa krav. Myndigheten vill betona vikten av att kraven den långsiktiga säkerheten och miljöpåverkan ställer på produktionen blir en naturlig del av projekterings- och byggarbetet. SKB bör i det fortsatta arbetet säkerställa att processerna blir utformade så att detta uppnås. SSM trycker även på att aspekter som är värda att beakta är MTO-frågor, att olika utfalls inverkan på den långsiktiga säkerheten kan vara svårbedömda och att vissa arbetsmoment inte går att göra ogjorda, exempelvis bergguttar som inte uppfyller kraven på den störda zonen.
- SSM anser att SKB bör vidareutveckla och förtydliga hur Eurokoden EN 1997-1:2004 (SIS 2005) kommer att implementeras i projekteringsarbetet och under produktionen.
- SSM anser att SKB bör förtydliga planerna för utveckling av detaljundersökningsprogrammet med mer precisa tidsangivelser för olika typer av undersökningar som kopplar till olika syften och krav.
- SSM saknar SKB:s planer för monitorering av relevanta parametrar.
- SSM ser positivt på att SKB ska se över metodiken för tolkning av hydrauliska egenskaper hos flödande strukturer. SKB bör i detta sammanhang förtydliga kraven på testernas effektivitet och möjligheter att bestämma flödesdimensioner och randeffekter. SKB bör inom översynen eller i annat passande sammanhang även förtydliga vad som avses med ”faktisk transmissivitet” och ”sammanhängande effektiv transmissivitet” i kravspecifikationen för berget som barriär och hur parametrarna kopplar till olika mätmetoder.

- SSM anser att det är betydelsefullt med precision i anläggningens placering i bergmassan och i förhållande till geologiska enheter. Myndigheten menar att det kan vara fördelaktigt med en tätare koppling mellan geodesi (tunnelkoordinater) och fotogrammetriska resultat från den geologiska karteringen.
- SSM noterade ånyo att det saknades uppgifter om metoder och instrument för att bestämma bergmassans och deformationszonernas hållfasthet och deformationsegenskaper. Detta påtalades ursprungligen av SKI i granskningen av Fud-program 2007. Myndigheten anser att SKB bör redovisa planerna för dessa eller motivera varför de inte tas upp. SSM ser vidare positivt på SKB:s påbörjade utredning om ett lokalt seismiskt nätverk i Forsmark och att det är viktigt att en bra bakgrundsbild av mikroseismicitet etableras innan byggandet av förvaret påbörjas. Myndigheten anser därutöver att SKB bör utvärdera möjligheten att utnyttja mikroseismiska data för att förbättra förståelsen av bergmassans storskaliga deformationsbeteende.
- SSM anser att metodiken för detektering av långa sprickor är viktig och att SKB bör fullfölja de beskrivna planerna. Myndigheten anser det även betydelsefullt att möjligheten till detektering med tillhörande osäkerhetsbeskrivning kopplas till konstruktionsförutsättningarna på ett lämpligt sätt.
- SSM saknar information om huruvida SKB anser sig ha en tillräckligt god kunskap om injektionsmedlens påverkan på hydrogeokemin och om ytterligare forskning och utveckling är planerad. Likaså saknar myndigheten en redovisning om förstärkningsåtgärders påverkan på den långsiktiga säkerheten, exempelvis bergbultar, nätning och sprutbetong.
- SSM anser att det är viktigt att SKB kan visa att kraven som konstruktionsförutsättningar ställer på skadezonen kan uppfyllas vid tunneldrivning under produktionsförhållanden i Forsmark.
- SKB bör redovisa hur skadezonen i golvet kan förväntas vara beskaffad.

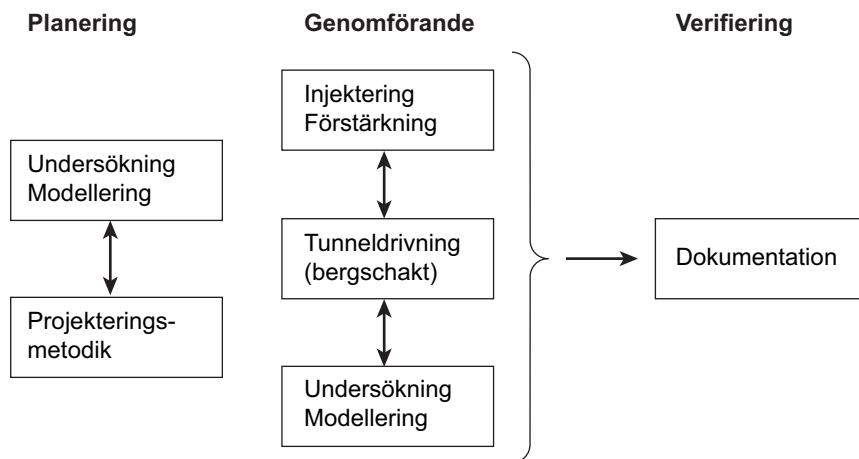
Sammanställning av nuläge och program

Sedan Fud-program 2010 presenterades har SKB bland annat tagit fram ett ramprogram för detaljundersökningar, lämnat in tillståndsansökningar och byggt ut Äspölaboratoriet. Utbyggnaden som slutfördes i januari 2013 har gett möjlighet att för första gången integrera detaljundersökningar, projektering inklusive tillämpning av observationsmetoden och bergarbeten där kvalitetskrav på utförande tillämpats i produktion. De nya tunnarna ger möjlighet att testa metoder för detaljundersökningar. Detta kommer att följas upp avseende hur väl ställda krav på tunneldrivningen lyckats minimera sprängskadezonens omfattning, speciellt i golvet.

Brytningen av yttre sektionen av Prototypförvaret i Äspölaboratoriet har stärkt tidigare bergmekanisk forskning, se avsnitt 13.11 Prototypförvaret.

Huvuduppgifter och mål för teknikutvecklingsprogrammet för berg, som redovisas i avsnitten 14.3 till 14.5, kan sammanfattas enligt följande:

- Vidareutveckla metodiken för bergprojektering och tillämpningen av observationsmetoden. Detta avser i första hand strategier för detaljanpassning av deponeringsområden och samordning av detaljundersökningar och byggproduktion.
- Vidareutveckla metoder och utrustning för detaljundersökningar med tillhörande modellering, i ett första steg inför bygget av tillfarterna, och i ett andra steg inför utbyggnaden av deponeringsområden.
- Vidareutveckla produktionsmetoder anpassade till de krav som ställs avseende berguttag, stadga och täthet. Målet är i första hand att kunna ange utförandekrav i bygghandlingarna för tillfarter samt metoder för verifiering av att kraven uppfylls. Utförandekraven och verifiering av dessa kommer att vidareutvecklas för att tillfredsställa de unika krav som gäller avseende berget under nivån för toppförslutningen.
- Säkerställa att godkända och tillräckligt beprövade konstruktionsmaterial är tillgängliga i tid för bygget av tillfarterna och senare inför bygget av förvarets deponeringsområden.
- Utveckla kontrollplaner, inklusive format och rutiner för dokumentation och för relationshandlingar, så att dessa är utvärderade och fastställda när bergarbetena inleds. Program för detta kommer att redovisas i samband med kommande säkerhetsredovisningar.
- Demonstrera strategier och metoder för ett integrerat och kvalitetssäkrat arbetssätt från undersökning till färdig tunnel, se figur 14-1.



Figur 14-1. Översikt över de huvudaktiviteter som behövs för ett integrerat och kvalitetssäkrat byggande av slutförvarsanläggningen.

Tidsplanerna avseende teknikutveckling som berör berg skiljer sig delvis från annan teknikutveckling. Detta beror på att väsentliga delar av tekniken som berör berget måste vara färdiga att tas i drift vid byggstarten. Det gäller undersökningar, projektering och byggande av tillfarterna till slutförvarsanläggningen, som inbegriper schakt och ramp. Återstående delar måste vara klara att tas i drift i takt med att utbyggnaden av centralområde och senare deponeringsområden på förvarsnivån startar.

14.3 Metodik för bergprojektering

Bergprojekteringen omfattar den konstruktiva utformningen och platsanpassningen av Kärnbränsleförvaret. Krav och förutsättningar anges i avsnitt 14.1 och baseras bland annat på SSM:s föreskrifter. Ytterligare krav förväntas i och med miljödomens villkor i kommande tillstånd. Förutsättningar för bergprojekteringen ges även av platsförhållanden i Forsmark och slutförvarsanläggningens utformningskrav (läge, dimensioner, konstruktiv livslängd etc). Krav på verifiering av konstruktioner anges i Eurocode, se Program i avsnitt 14.3. Eftersom projekteringen ligger till grund för uppförandet av anläggningen, ingår även specifikationer i utförandet för att uppfylla ställda krav. Integrering med detaljundersökningar som identifierar platsförhållanden är fundamental för platsanpassning av undermarksutrymmena och för val av teknisk lösning anpassad efter bergets variabilitet.

Nuläge

Sedan Fud-program 2010 har SKB bevakat och delvis deltagit i branschgemensamma arbeten kring konstruktiv utformning av tunnlar och bergrum. Ingenjörsvetenskapsakademien har drivit ett projekt för implementering av Eurocode i geoteknisk design, IEG, (Implementeringskommission för Europastandarder inom Geoteknik) som samlat flera aktörer i Sverige. En del av arbetena är specifikt riktat till undermarksbyggande. Dokumenten som redovisas är rådgivande. Genom sammanslagning av Vägverket och Banverket till Trafikverket har myndigheten sett över och uppdaterat sina riktlinjer för konstruktiv utformning av tunnlar (Trafikverket 2011), vilket är ett bra stöd i det fortsatta planeringsarbetet inför detaljutformning av Kärnbränsleförvaret.

Fud-program 2010 redovisade SKB:s strategi att tillämpa observationsmetoden. Detta är en projekteringsmetod som tillämpas vid undermarksbyggande när det kan vara svårt att i förväg förutsäga alla parametrar som kan påverka projektet. Angreppssättet beskrevs första gången i slutet av 1960-talet. För aktuell konstruktion ska möjligt och acceptabelt beteende fastställas. Med beteende avsågs ursprungligen stadga och stabilitet för konstruktionen. För slutförvaret har begreppet vidgats till att även omfatta anpassning till konstruktionsförutsättningarna inklusive krav med hänsyn till långsiktig säkerhet samt utförandekrav som relaterar till andra barriärer. Detta gäller till exempel maximalt tillåtet inläckage för att installera återfyllningen. IEG har ett tillämpningsdokument om observationsmetoden (IEG 2010) som bland annat enligt citat från detta dokument drar slutsatsen:

”Tillämpningen av observationsmetoden kan relativt enkelt integreras i dagens sätt att projektera geokonstruktioner. Det som är specifikt med observationsmetoden är att tekniska lösningar och kontrollprogram ska förberedas på sätt som möjliggör att hantera osäkerheterna i det geotekniska beteendet. Det geotekniska beteendet kan relatera till två kategorier av osäkerheter, antingen jordens beteende eller geokonstruktionens beteende och definierar vilka gränstillstånd eller kombinationer av gränstillstånd som behöver kontrolleras för den gällande dimensioneringssituationen. Beroende på osäkerheternas natur skall tekniska lösningar utformas som är anpassade för tänkbara avvikelser från förväntade förhållanden. Anbuds- och bygghandlingar måste utformas så att de formellt visar hur osäkerheterna i det geotekniska beteendet som identifierats i projekteringsskedet ska hanteras via kontrollprogram, kriterier och förberedda åtgärder. Byggherrens och utförarens platsorganisationer har ansvaret för att tillämpningen av observationsmetoden på ett effektivt och kvalitetssäkrat sätt integreras i byggprocessen.”

Inom ramen för utbyggnad av Äspölaboratoriet har observationsmetoden tillämpats i två avseenden:

- Styrning av injekteringsarbetet.
- Platsanpassning av ett antal nischer från nya tunnlar för att minska behovet av injekteringsarbete.

För en av de experimentnischer som skulle uppföras var önskemålet att ha så högt grundvattenstryck som möjligt. Det styrande kravet på injekteringsarbetet var att inte tillåta grundvattenavsänkning med mer än 50 meter. Den främsta osäkerheten i dimensionering av injektering var kopplat till acceptabelt inflöde för att inte överskrida avsänkingskriteriet. Det system för hydromonitoring (HMS) som finns på Äspö möjliggjorde effektiv observation av att kravet på grundvattenavsänkning inte överskreds. Det beslutades att observationsmetodens principer skulle användas för att dimensionera injektering och verifiera dess effektivitet gentemot ställda krav.

Observationsmetoden uppbyggs av de tre principiella stegen förutsägelse, observation, åtgärd.

Planering för observationsmetodens tillämpning i ett projekt görs i projekteringsskedet då all relevant information (data och modeller) används för att upprätta prognoser och etablera observationsprogram. Åtgärdsplaner tas fram för de fall då det föreligger osäkerheter om platsförhållanden som påverkar till exempel stadga, stabilitet eller tätning. Detta styr tillämpningen i utförandeskedet så att givna krav kan uppfyllas.

Vid tillämpningen vid Äspölaboratoriets utbyggnad konstaterades att den största osäkerheten låg i dimensionering av injektering för att uppfylla täthetskrav på några av de planerade experimentområdena. Därför fokuserades det på att i projekteringsskedet upprätta förutsägelser om bergets hydrogeologiska egenskaper och injekteringens effektivitet baserat på befintliga modeller och ny borrhålsinformation. Baserat på bedömning av tänkbara avvikelser från förväntade förhållanden och resultat fastställdes vilka åtgärder och tekniska lösningar som kunde vara acceptabla. I projektet omfattade detta:

1. Indata utgörs av borrhålsdata, bland annat mätta inflöden under borrning av pilothålen för de parallella tunnlar.
2. Inläckage till tunneln med och utan injektering bedöms, och tätningseffekt uppskattas. Konservativa antaganden ska leda fram till bedömning av värsta fall.
3. Samband mellan inflöden från pilothålen och avsänkning i närliggande hål som ingår i Äspö HMS-system fastställs och de borrhålssektioner som påverkas mest väljs som observationspunkter under tunneldrivningen.
4. Beslut om åtgärd i entreprenadarbetena baseras på accepterade avsänkingsnivåer enligt HMS-systemet och/eller inflöden från hål. Ansatta acceptansnivåer bör utvärderas redan vid tunneldrivningen inom den första injekteringsskärmen. Kontinuerlig uppföljning kan därefter leda till att acceptansnivåer justeras.

I utförandeskedet verifierades bergets hydrogeologiska egenskaper och injekteringens avsedda funktion utifrån resultat av mätningar och observationer. Förberedda åtgärder, till exempel förändringar i injekteringsmetodik, genomfördes där detta var motiverat. Observationsparametrarna i de olika stegen i cykeln för injektering till tunneldrivning summeras i tabell 14-1.

Tabell 14-1. Översikt av observationsparametrar och åtgärd som användes i samband med observationsmetodens tillämpning för injektering i Äspölaboratoriets utbyggnadsprojekt 2012.

Steg i drivningscykeln	Kontrollparameter	Beslut baserat på observationen
Sonderingshål	Flöde/hål (mät ett hål i taget).	Injekteringsstrategi (en eller två skärmar).
	HMS-respons.	Viktig information som tidig indikation på förväntade responser.
Injektering	Tryck, flöde, volymer, tider per hål. Typ av bruk.	RTGC* – efteranalys för att bedöma brukspridning och löpande utvärdera ansatta stoppkriterier.
	HMS-respons.	Är tryckets återhämtning acceptabel? Kan salvbörning starta?
Börning av salvhål	Vatten i salvhål.	Rapportera till aktivitetsledare.
	HMS-respons.	Är avsänkning enligt HMS-monitoring inom acceptanskriterium så att laddning – sprängning kan göras?
	Foto-dokumentation av stuff.	Dokumentation av läge för flödande borrhål. Var behöver åtgärd göras?
Sprängning – utlastning – skrotning	HMS-respons.	Är avsänkning enligt HMS-monitoring fortfarande inom acceptanskriterium?
Tunnelkartering	Vattenförande sprickor, läge för injekteringsbruk.	Bedöm effektiviteten i utförd injektering.
Mäta inläckage vid mätvall	Avläsning veckovis (måndag morgon) för att följa upp totalt inläckage.	Bedöm tätningseffekt. Behov av förbättring?
	HMS-respons.	Bedöm tätningseffekt. Behov av förbättring?

* RTGC = Real Time Grout Control, se avsnitt 14.5.1 Injektering.

En prognosmodell över vattenförande strukturer hade upprättats baserat på undersökningsresultaten. Tunnlarna karterades löpande och modellen över vattenförande strukturer uppdaterades löpande. Baserat på dessa detaljundersökningar och modellering platsanpassades experimentnischerna med ambition att ge ett lågt injekteringsbehov.

Program

Tillämpningen av observationsmetoden avseende injektering och platsanpassningsstrategier i samband med Äspölaboratoriets utbyggnad kommer att ingå som illustrativa exempel i strategibeskrivning över observationsmetoden. Grundläggande i denna strategibeskrivning är detaljerade processbeskrivningar som visar implementering av detaljundersökningar med projektering, samt genomförande av tunnelarbetena med flexibilitet inom ramen för förutbestämda åtgärder i enlighet med observationsmetodens övergripande syften.

Med stöd av erfarenheterna från projektering för och utbyggnad av Äspölaboratoriet 2012 har en processkartläggning av projekteringsprocessen och dess verifiering påbörjats. En viktig utgångspunkt är att i möjligaste mån anpassa till terminologi och styrning i Eurocode, speciellt:

- SS-EN 1990 (SIS 2010) främst avsnitten 2 Krav och 3.2 Val av dimensioneringssituation.
- SS-EN 1997-1:2005 (SIS 2005) avseende tillämpningen av avsnitten 2.4 Beräkning, 2.5 Hävdvunna metoder (inklusive empiriska metoder) samt 2.7 Observationsmetoden.
- Därutöver kommer SKB att ta fram förslag för dimensioneringsrutiner av Kärnbränsleförvaret med hänsyn till jordbävning under drift, eftersom SS-EN 1998-4:2006 (SIS 2006) och dess nationella annex inte är relevant för kärnteknisk anläggning.

Baserat på processkartläggning av projektering samt verifiering av konstruktioner kommer en preliminär kvalitetsplan för projektering att tas fram inför nästa steg projektering av Kärnbränsleförvaret (detaljprojektering). Att ta fram och implementera kvalitetsplaner är en uppgift för samtliga produktionslinjer för KBS-3, men Berglinjen kommer först ut med kvalitetsplaner för styrning av

planering och uppförande av Kärnbränsleförvarets tillfarter. Kvalitetsplan för projektering integreras med detaljundersökningarna, vilka ger värdefull styrning av bland annat platsanpassning av Kärnbränsleförvaret. Kvalitetsplanen ska vara helt färdig inför upphandling av entreprenörer för bergarbetena och till fullo implementerad i tillämpliga delar för uppförande av Kärnbränsleförvaret.

14.4 Detaljundersökningar

Ett detaljundersökningsprogram kommer att tas fram som en vidareutveckling av det ramprogram för detaljundersökningar som tidigare presenterats (SKB 2010j). Vidare kommer metoder och verktyg för detaljundersökningar i samband med slutförvarets uppförande och drift att vidareutvecklas. I arbetet beaktas de uppdaterade konstruktionsförutsättningarna. Vidareutveckling av arbetsprocesser kommer att vara en viktig komponent inte minst vid upprättande av kvalitetsstyrning och kontroll i samband med Kärnbränsleförvarets uppförande och drift.

Under tiden fram till byggstart kommer ett detaljerat undersökningsprogram att tas fram till uppförande av slutförvarsanläggningens tillfarter och centralområde som ska omfatta undersökningar, framtagning av geovetenskapliga modeller, datahantering samt kvalitetssäkring av data och modeller. Vidare ska ett preliminärt program tas fram som redovisar strategier och metodik för kontroll av krav rörande säkerhet efter förslutning och hur krav på acceptans av deponeringshål ska realiseras i praktiken.

14.4.1 Översikt och strategier

Nuläge

Med detaljundersökningar avses de undersökningar (inklusive monitorering), analyser och modelleringar som utförs i samband med Kärnbränsleförvarets uppförande och drift. Detaljundersökningarnas syften är enligt SKB:s ramprogram för detaljundersökningar att:

- Ge underlag för anpassning av förvaret till de platsspecifika förhållandena för att uppfylla konstruktionsförutsättningarna, bland annat med avseende på långsiktig säkerhet.
- Ge underlag för ingenjörsmässiga beslut om till exempel injekterings- och förstärkningsåtgärder.
- Uppdatera platsmodeller, som i sin tur utgör underlag för säkerhetsanalyser avseende långsiktig säkerhet.

Ramprogrammet (SKB 2010j) presenterades i nära anslutning till Fud-program 2010 och utgjorde underlag till SKB:s ansökningar om att få uppföra ett slutförvar för använt kärnbränsle. Ramprogrammet gav en samlad redovisning av strategier och metoder för detaljundersökningarnas genomförande med hänsyn till platsspecifika förhållanden och frågeställningar i Forsmark. Det inkluderade även en översiktlig plan för vidareutveckling av metoder och verktyg för undersökningar, modellering och datahantering.

Vidareutvecklingen av metodiken för detaljundersökningar är uppdelad i två skeden. I det inledande utvecklingsskedet har fokus legat på metodik för förvarets uppförande, det vill säga förvarets tillfarter (ramp och schakt) och centralområde. I ett senare utvecklingsskede fokuseras arbetet på metodik för slutförvarets driftfas med successiv beredning av deponeringsområden på förvarsnivå.

Program

I enlighet med ramprogrammets planering genomförs under 2011–2016 ett projekt för vidareutveckling av metoder, verktyg och program för undersökningar och modellering inför byggstart. Projektets effektmål är att krav avseende platskaraktärisering och konstruktionsförutsättningar avseende krav på berget ska kunna verifieras, att anläggningen kan uppföras med acceptabel påverkan på omgivningen, och att förnyade säkerhetsanalyser ska kunna genomföras.

Projektets mål är att:

1. Vidareutveckla metoder och verktyg för detaljundersökningar med tillhörande modellering. Detta görs med fokus på de delar som ska användas vid uppförande av tillfarter och centralområde. Verktyg avser här i bred mening instrument för mätningar liksom de datasystem och koder som används för visualisering och modellering med tillhörande metodik.
2. Vidareutveckla detaljundersökningsprogrammet för uppförande av tillfarter och centralområde som beskriver undersökningar och modellering med tillhörande datahantering, kvalitetssäkring och redovisning.
3. Utarbeta och prova strategier och metodik för kontroll av krav på säkerhet efter förslutning (konstruktionsförutsättningar). Inleda vidareutveckling av metoder och verktyg som behövs för detaljundersökningar som ska användas i deponeringsområden.

Utvecklingsinsatserna fokuseras på de verktyg som ska användas under uppförande av tillfarter och centralområde (punkterna 1 och 2 ovan), samt sådan utveckling för deponeringsområden som beräknas ta lång tid i anspråk och därför behöver påbörjas tidigt (punkt 3 ovan). Ett exempel på detta är metodik för identifiering och karakterisering av stora sprickor. Övrig utveckling för detaljundersökningar i deponeringsområden kommer huvudsakligen att genomföras i ett efterföljande utvecklingsprojekt.

Efter ett genomgripande planeringsarbete har utvecklingen av undersöknings- och modelleringsmetodik samt av instrument och datasystem nu inletts. Utvecklingsbehovet som i grunden är baserat på behov av information har fastlagts efter analys av den befintliga metodiken. Utvecklingen spänner över ett stort område och är grupperat i teknik- och ämnesområden av vilka några beskrivs i avsnitt 14.4.2 Modellering och undersökningar. Teknikutveckling ska resultera i färdiga metoder och verktyg med tillhörande dokumentation i form av manualer och metodbeskrivningar. En viktig komponent är att överföra kunskap och implementera resultaten av detta till det samlade arbetet med Kärnbränsleförvaret.

Vidareutvecklingen av det detaljundersökningsprogram som presenterades i SKB (2010j) görs utifrån:

- Ny kunskap som erhållits.
- Resultat från pågående och genomförd utveckling.
- Erfarenheter från genomförda undersöknings- och modelleringsarbeten.

Strategier, metoder och verktyg kommer att ställas samman till detaljundersökningsprogram som beskriver hur platskarakteriseringen kan genomföras. I programmet ingår att konstruktionsförutsättningarna avseende krav på berget kan verifieras, att anläggningen kan uppföras med acceptabel omgivningspåverkan samt att förnyade säkerhetsanalyser kan genomföras. En programrapport kommer att utarbetas som presenterar ett uppdaterat detaljundersökningsprogram för Kärnbränsleförvarets uppförande. Detta utgör underlag både för detaljprojektering och för dokumentet om säkerhet under uppförande av slutförvarsanläggningen (se 10.3.1). Vidare kommer strategier för undersökningar, inklusive monitorering, och modellering inom deponeringsområden att presenteras. Detta berör deponeringsområdets utbyggnad och acceptans av kapselpositioner samt för dokumentation av initialtillstånd och utgör underlag till PSAR (se 10.3.1).

En viktig uppgift för detaljundersökningarna är att under den stegvisa utbyggnaden av ett deponeringsområde bidra med karakteriseringsresultat som ligger till grund för beslut om placering och realisering av deponeringstunnlar och deponeringshåll. Verifiering av att konstruktionsförutsättningarna blir uppfyllda är en viktig del i detta sammanhang. Inom nu pågående arbete kommer framför allt konstruktionsförutsättningar kopplade till deponeringshåll (stora sprickor och vatteninflöden) att behandlas. Övriga konstruktionsförutsättningar liksom fortsatta studier av stora sprickor kommer att framför allt behandlas i det efterföljande utvecklingsarbetet som ska fokusera på detaljundersökningsmetodik för deponeringsområdet.

Stora sprickor betecknar mindre deformationszoner och uthålliga enskilda sprickor som vid seismiska händelser skulle kunna medföra kapselskada på grund av skjivning. Metoder för identifiering och karakterisering av stora sprickor kommer att studeras genom fältundersökningar i Äspölaboratoriet, varvid undersöknings- och modelleringsmetodernas användbarhet kommer att analyseras och värderas, se avsnitt 14.4.4 Detaljundersökningar, Stora sprickor. Detta ger underlag för beslut om nödvändig vidareutveckling samt bidrar till hur konstruktionsförutsättningens formulering kan förbättras och dess kriterium förtydligas.

Detaljundersökningarna ställer stora krav på kontrollerade dataflöden, kvalitetssäkring av data och modeller samt på tydliga informations- och beslutsprocesser under uppförande och drift av slutförvarsanläggningen. Planering för hur detaljundersökningarna kommer att kvalitetssäkras under uppförandeskedet respektive driftskedet utgör en del av det kvalitetssäkringsarbete som planeras, se avsnitt 10.2.2. I detta arbete ingår bland annat att vidareutveckla beskrivning av arbetsprocesser, ta fram rutiner och instruktioner för de metoder och verktyg som avser detaljundersökningar liksom rutiner för dokumentation och redovisning av detaljundersökningsresultat. Erfarenhet från bland annat SKB:s genomförda platsundersökningar samt utbyggnaden av Äspölaboratoriet utgör viktiga underlag för detta.

14.4.2 Undersökningar och modellering

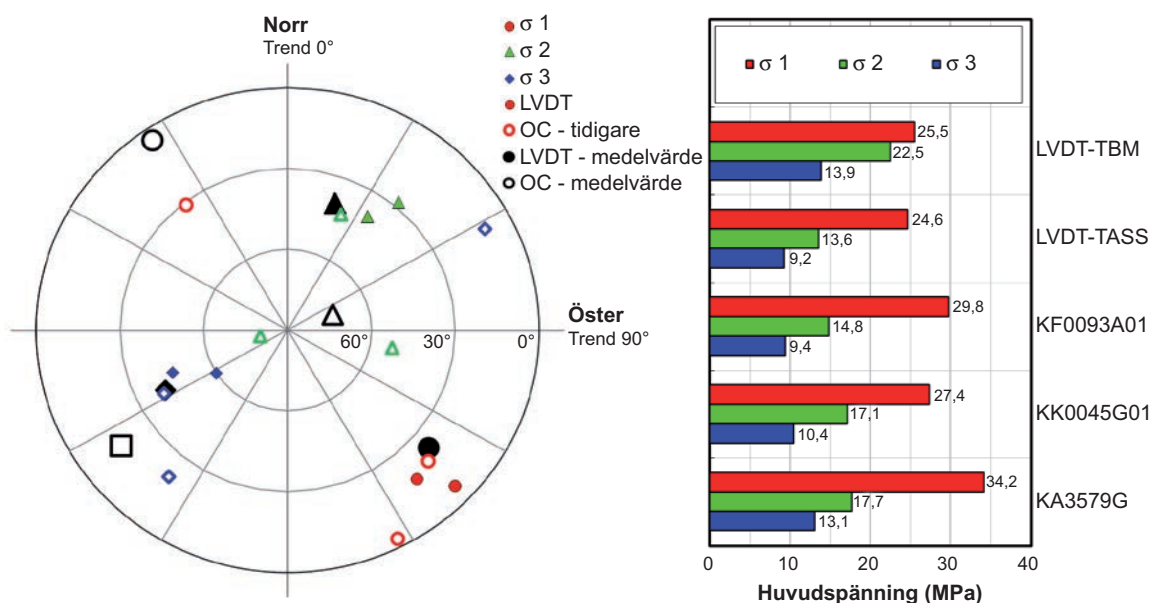
Nuläge

Sedan Fud-program 2010 redovisades har ett planeringsarbete genomförts för detaljundersökningarna med successiv prioritering och fokusering. För varje utvecklingsobjekt har kravspecifikationer upprättats som belyser krav både på slutprodukt och behov av metodikutveckling. Dessa har sedan legat till grund för upprättande av specificerade utvecklingsplaner.

Två projekt avseende bergspänningsmätningar har utförts under den senaste treårsperioden. Det ena projektet har utvecklat en borrhålsmetod för bestämning av bergspänningarnas orientering, Slits (Hakami 2011). Metoden bygger på möjligheten att inducera termiska spänningar i ett borrhål så att spjälkning uppnås och där spjälkningens orientering kan korreleras med den största horisontella huvudspänningen. Den senare har bland annat betydelse för orienteringen av deponeringstunnlar. Det andra projektet (Hakala et al. 2013) har tagit fram en LVDT-cell (Linear Variable Differential Transducer) för bergspänningsmätning i tunnlar. Instrumentet installeras i ett antal pilotborrhål med diametern 120 millimeter i en tunnelsektion och överborras därefter med en diameter på 200 millimeter. Töjningsdata från LVDT-givarna som mäter i fyra olika riktningar, en detaljerad laserskannad modell av tunnelavsnittet där mätningen utförts samt elasticitetsmodul uppmätt på solida borrhåll från pilothålen ligger till grund för inversmodellering av det rådande spänningsfältet.

Verifierande mätningar med LVDT-cell i Äspölaboratoriet på 450-metersnivån, där spänningsfältet är väl karakteriserat, visar att resultaten från mätningarna med LVDT-cellen överensstämmer med tidigare resultat från överborrningsmätningar genomförda i Äspölaboratoriet, se figur 14-2, samt tidigare resultat och spänningsmodell (Christiansson och Janson 2003).

I enlighet med Fud-program 2013 har SKB utvecklat ett skräddarsytt tunnelkarteringssystem eftersom inget existerande kommersiellt system svarat upp mot SKB:s behov. Karteringssystemet bygger på moduler för fotogrammetri och digital kartering i fält. Efter varje sprängsalva genomförs fotografering för att generera underlag för geologisk kartering i tre dimensioner av tunnelfronten. Efter lyckade systemtester i Äspölaboratoriet har karteringssystemet använts under utbyggnaden av nya experimenttunnlar på 420-metersnivån i Äspölaboratoriet. Resultatet användes där för att successivt bygga och uppdatera geologiska modeller/prognoser. När tunnelns front avancerat vidare mobiliserades karteringssystemet på nytt för kartering av tunnelväggar och tak när aktuellt tunnelavsnitt förklarats säkert. Framtagna modeller av tunneln i tre dimensioner, med eller utan strukturer, kan importeras till visualiseringssystem och CAD-system. Där kan vidare behandling och analys utföras, till exempel uppföljning av utsprängda bergvolym (tunnelkonturer) i förhållande till teoretiskt avsedd kontur.



Figur 14-2. Jämförelse av resultat från LVDT med resultat från konventionell överborrningsmetod. Stereoplotten till vänster visar huvudspänningarnas orientering, histogrammet till höger visar spänningsmagnitud för olika mätningar. OC = överborrningsmetoden. Magnituder för tidigare resultat med överborrningsmetoden på 450-m nivån på Äspölaboratoriet redovisas i de tre nedersta stapelgrupperna. LVDT-TBM är från en sektion i en borrhad tunnel och LVDT-TASS är från en sprängd tunnel.

SKB har sedan 2010 deltagit i MoDeRn (Monitoring Developments for Safe Repository Operation and Staged Closure), ett fyraårigt projekt (2009–2013) inom den 7:e Europeiska gemenskapens ramprogram. Projektet har behandlat frågor rörande monitorering och på vilket sätt monitorering kan bidra till långsiktiga säkerhetsstrategier och tekniska utformningar av slutförvarsanläggningar i tre olika geologiska miljöer (lera, salt och kristallin berggrund), samt till allmänhetens förståelse och förtroende för slutförvaring av radioaktivt avfall i undermarksanläggningar.

Det övergripande projekt målet var att precisera och dokumentera de olika deltagarländernas angreppssätt, teknik samt olika intressenters ståndpunkter (myndigheter och allmänhet) med syfte att ge referenser och stöd till de nationella monitoreringsprogrammen. Projektet har omfattat:

- Monitoreringens mål och strategier, samt framtagning av riktlinjer för utformning av monitoreringsprogram som tar hänsyn till gällande tekniska och samhälleliga sammanhang, gällande lagstiftning i respektive land samt krav från intressenter (inklusive myndigheter och allmänhet).
- Framtagning och demonstration av innovativ teknik.
- Dokumentation av fallstudier som illustrerar kartläggning av mål och strategier, vilka parametrar som behöver monitoreras, hur mätfel och oväntade händelser kan förebyggas och upptäckas.
- Sociologiska studier för att skapa bättre förståelse för synpunkter från allmänhet och andra intressenter.

För närvarande pågår diskussioner om ett efterföljande samarbetsprojekt med fokus på hur monitoreringsdata ska användas som indata för modellering och analyser av säkerhet efter förslutning samt till stöd för beslutsprocessen under uppförande och drift av slutförvarsanläggningen.

Program

Modellering under byggskedet kommer att i olika skeden ha olika mottagare som har olika krav; projektering, byggproduktion, platsförståelse och säkerhet efter förslutning. Projektering och byggproduktion har behov av prognoser/modeller i mindre skalor vilket innebär att anpassad och delvis ny modelleringsmetodik behöver tas fram. Vidare behöver uppdaterad metodik tas fram för platsbeskrivande modeller, med speciell tonvikt på utnyttjande av modeller i mindre skala som underlag. Utveckling av integrerad modelleringsmetodik betonas, där den huvudsakliga integrationen med avseende på projektering och bygge sker inom ämnesområdena geologi och

hydrogeologi. Specificerade behov, krav och kriterier kopplade till långsiktig säkerhet tillhandahålls av kärnbränsleprogrammet som uppdaterar konstruktionsförutsättningarna till mätbara krav i relation till resultaten från SR-Site, se avsnitt 10.2.1 Konstruktionsförutsättningar.

Modellering under uppförande av tillfarter och centralområde sker i en föränderlig och störd miljö. Detta är en viktig utgångspunkt för vidareutvecklingen av modelleringsmetodik för samtliga ämnesområden och ställer krav på effektiv datainsamling från monitoring relativt det uppmätta utgångsläget, baseline (se avsnitt Monitoring nedan). Modellerade och uppmätta förändringar relateras till baseline som därmed utgör en viktig förutsättning för kalibrering av kvantifierande modeller.

Modellering av diskreta spricknätverk (DFN) utgör en viktig komponent i beskrivningen av berget och har kopplingar till ett flertal av ämnesområdena. Utveckling av DFN sker inom forskning för analys av långsiktig säkerhet, se avsnitt 26.24.1, i nära samspel med utvecklingen av övriga verktyg för detaljundersökningar.

Utveckling av metoder och verktyg för undersökningar som genererar primärdata till modellering utförs så att testade och godkända metoder och instrument är färdiga när undersökningar ska utföras vid Kärnbränsleförvarets uppförande och drift. Utvecklingsarbetet kan handla om vidareutveckling av befintlig metod, införskaffande av ny metod eller instrument eller uppgradering av metodbeskrivning, som huvudsakligen handlar om anpassning för tillämpning under jord.

I det följande beskrivs pågående och planerad ämnesvis utveckling av modelleringsmetodik och kopplad utveckling av metoder och instrument.

Geologi, geofysik, geodesi

Vidareutveckling av enhålstolkning av borrhålsdata (SHI) samt nyutveckling av en tillämpning enligt samma principer på underjordsöppningar, så kallad entunneltolkning (STI), utgör viktiga delar inom modelleringsmetodiken. En väsentlig komponent i utvecklingsarbetet är att föra in hydrogeologisk information i beskrivningen av det geologiska ramverket redan i samband med SHI och STI.

Inom metoder/instrument och datasystem genomförs vidareutveckling av tunnelkarteringssystemet och Boremap-systemet för kartering av borrhålsdata. Vidare anpassas tillämpliga borrhålsgeofysiska metoder för användning under jord. En experimentanläggning (analog till ett borrhål) byggs på markytan på Äspö. Denna anläggning har bland annat en väl bestämd småskalig krökning som återkopplar till de höga krav som ställs inom KBS-3H (horisontell deponering), se kapitel 16. Den möjliggör tester, jämförelser och verifikationer av olika mätmetoder och instrument för krökningsmätning och förväntas öka tilltron till dessa.

Det finns ett flertal geometriska krav på Kärnbränsleförvarets bergutrymmen. För att bufferten i deponeringshålen och återfyllningen i deponeringstunnlarna ska kunna placeras korrekt och uppfylla sina konstruktionsförutsättningar måste hålrummens dimensioner hållas inom givna toleranser. Detta ställer krav på utrustning och metoder avseende noggrannhet i inmätning av hålrummens geometri. Metodik för detta ska tas fram och testas innan samfunksprovning genomförs inför Kärnbränsleförvarets driftskede.

Bergmekanik

Utveckling inom bergmekanisk modellering innefattar metodik för modellering av bergmassans egenskaper med ökad integration av geologisk och hydrogeologisk information. Övrig utveckling av modelleringsmetodik sker inom forskning för analys av långsiktig säkerhet, se avsnitt 26.24 Geosfär, Modellering.

Fortsatta studier har gjorts avseende mikrostrukturers beroende av dominerande strukturer i berggrunden (Nicksiar och Martin 2012, Lim et al. 2012). Utveckling avser applicering av nya generationens bergmekaniska beräkningsprogram som drivits fram av gruvbranschens behov. Utvecklingsarbetet syftar till att beskriva bergmassans sammansättning från mikro- till makroskala. Brott kan beräkningsmässigt initieras i den svagaste länken, vare sig denna består av intakt berg, sprickor eller deformationszoner. Inledande beräkningsfall baserat på det väl dokumenterade Äspö Pillar Stability Experiment (Andersson 2007) ger god överensstämmelse mellan observation och modellering (Lan et al. 2013).

I det fortsatta utvecklingsarbetet av metoder och instrument genomförs fortsatt anpassning av metoderna Slits och LVDT för bestämning in situ av spänningsfältets orientering och magnitud. Vidare genomförs metodutveckling för utvärdering av bergspänningssituationen från mätningar av tunnelkonturens konvergens.

Hydrogeologi

Utveckling inom hydrogeologisk modellering innefattar ett flertal komponenter och kännetecknas av förstärkt integration, mot såväl geologi som mot hydrogeokemi, transportegenskaper och ytsystem. Integrationen kommer att förstärkas ytterligare avseende både beskrivande (konceptuell) och kvantifierande modellering. Utveckling av metodik för modellering av diskreta spricknätverk kommer att genomföras i en samlad kontext för geologi och hydrogeologi inom forskning för analys av långsiktig säkerhet, se avsnitt 26.24.1. Undersökningar under jord förväntas ge förbättrat underlag för beskrivning av sprickornas storleksfördelning och för beskrivning av fördelningen av transmissivitet i enskilda sprickplan. En förbättrad beskrivning av sprickornas heterogena hydrauliska egenskaper ger också ett förbättrat underlag för att beskriva berget inför injektering, se avsnitt 14.5.1.

Mer utvecklade modeller kommer att krävas för att beskriva och förstå de ibland komplexa processerna i närheten av underjordiska öppningar. Resultat från inflödesmätningar och hydrauliska tester för en deponeringstunnel eller för ett deponeringshål i kombination med modellering förväntas ge ett förbättrat underlag för kontroll av att konstruktionsförutsättningar blir uppfyllda. Modellering med syfte att komma fram till praktiskt användbara inflödeskriterier har inletts, se avsnitt 26.4.3. Förbättrade metoder och beskrivning av den störda zonens utbredning och egenskaper erhålls från pågående studier i Äspölaboratoriet, se avsnitt 26.9 och 26.4.2. Utvecklingsinsatser görs för att inkludera kemiska reaktioner i befintliga flödesmodeller. Dessa verktyg kan bland annat utnyttjas för att studera effekter av cementlösningar på bufferten och samspelet mellan berg och buffert.

Utvecklingen av modelleringsmetodik genomförs med en samtidig anpassning av utrustning och metodik för genomförande och tolkning av hydrauliska tester inklusive flödesloggning för tillämpning under jord i lågpermeabelt berg. Detta inkluderar förenklade tester i sonderingsborrhål som underlag för förbättrad konceptuell beskrivning av flödande strukturer, bland annat fördelningen av transmissivitet i enskilda sprickplan i DFN. Vidare kommer metodik och utrustning för hydromonitoring och mätning av inflöden till tunnlar att vidareutvecklas med utgångspunkt från erfarenheter från Äspölaboratoriet.

Hydrogeokemi

Utveckling inom hydrogeokemisk modellering innefattar vidareutveckling av manuell explorativ datautvärdering. Detta görs med stöd av statistiska metoder och utveckling av metodik för uppföljning av kortfristig påverkan på hydrogeokemin i ett stort system. Stor vikt läggs vid att bättre integrera modelleringen av hydrogeokemi och hydrogeologi vid byggandet av hydrogeokemiska platsbeskrivande modeller, se också avsnitten 26.11 och 26.15. Vidareutveckling av metoder och instrument omfattar mätning med mätcell online, samt provtagning i avmanschetterad sektion av lösta gaser, av matrisvatten och av grundvatten under borring.

Transportegenskaper

Modelleringsstrategi och metodik för platsbeskrivande transportmodellering uppdateras med utgångspunkt från faktiskt genomförande och erfarenheter från SDM-Site (Crawford 2008, SKB 2010k). Detta sker i nära samverkan med övrig forskning, intern och extern, som kopplar mot transport och retention, se avsnitten 26.12–26.16. Metodik avseende modellering av bergets transportegenskaper behöver inte vara fullt färdigutvecklade till byggstart. Därför har bland annat situationen i anslutning till deponeringsområden hänförs till det efterföljande utvecklingsprojektet med fokus på detaljundersökningsteknik för deponeringsområden.

Ytsystem

Utveckling av modelleringsmetodik för ytsystem kopplar främst till förstärkt integration med bergets hydrogeologi för att etablera en samlad beskrivning av grundvattenflöden som täcker hela

den hydrologiska cykeln. Modellering av störningar i ytsystemet under den successiva utbyggnaden är en viktig komponent. Detta innefattar kvantifiering och identifiering av orsaker, och analyser av nödvändiga åtgärder för att förhindra/reducera oönskade förändringar. Detta har nära beröring till utveckling av metoder för vattenprovtagning samt uppföljning i fält av landskapsutveckling och naturvärden.

Borrning

För undersökningsborrning industrialiserats metoder och verktyg vid kärnborrning för att möjliggöra utförandet med jämn och hög kvalitet. Viss kringutrustning för kärnborrning under jord kommer att tas fram. Utrustningen ska möjliggöra korta etableringstider och ge gynnsamma förutsättningar för att borra upp till 300 meter långa kärnborrhål med höga kvalitetskrav på utförande, geometri, datainsamling och dataleverans.

Vid undersökningsborrning kan inflödet av grundvatten behöva minskas och/eller omgivande berg i flacka eller horisontella kärnborrhål behöva stabiliseras. Detta kan göras med hjälp av mekanisk stabilisering och (selektiv) injektering för att kunna fortsätta kärnborrningen och utföra de planerade undersökningarna i färdigborrade borrhål. Utrustning måste anpassas och utvecklas för tillämpning under jord.

Monitering

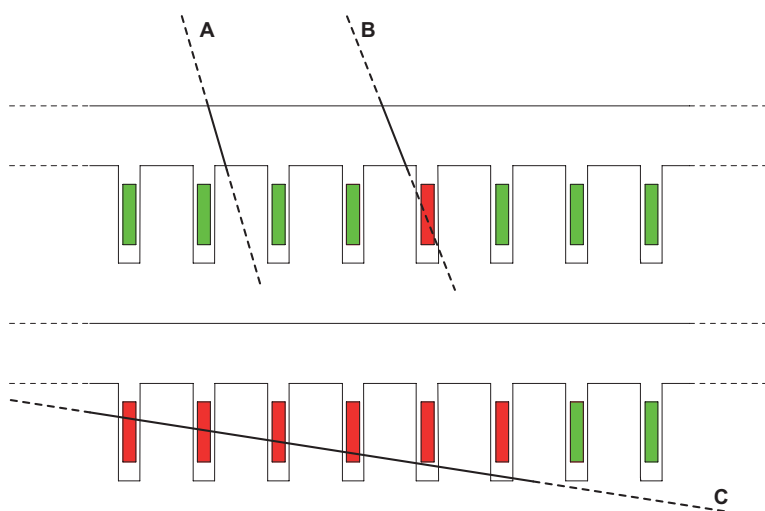
Baseline beskriver naturliga förhållanden på platsen innan dessa påverkas av förvarets uppförande. En omfattande baseline har etablerats som bland annat innefattar mätningar av hydrogeologiska tillståndsvariabler (grundvattentryck/grundvattennivåer i jordlager och berg), hydrologiska parametrar (grundvattenflöden i vattendrag, sjönivåer), liksom hydrogeokemiska, meteorologiska och oceanografiska parametrar. Monitering av förändringar i förhållande till baseline utgör en del av detaljundersökningsprogrammet där befintligt moniteringssystem för meteorologi, ytvatten och grundvatten kommer att användas. Vissa borrhålsinstallationer kan behöva modifieras för att kunna mäta avsänkningar nära anläggningen. Då undermarksutrymmen finns tillgängliga kommer moniteringen även att omfatta inflödet av grundvatten till olika tunnelavsnitt. För detta kommer förbättringar av traditionell teknik att genomföras på vissa delar. Systemet för datainsamling inom monitering kommer även det att utvecklas vidare, se även avsnitt 14.4.4.

Inför byggandet av Kärnbränsleförvaret i Forsmark planeras etableringen av ett lokalt seismiskt nät. Detta möjliggör observation av jordskalv av betydligt lägre magnitud än de som kan registreras inom det nationella nätet. Med ett sådant mikroseismiskt nät kommer dels naturliga skalv, dels sådana som förorsakas av bygget att övervakas. Till de senare hör främst sprängningar, men även till exempel spänningsinducerade seismiska händelser som orsakas av berguttag eller möjliga temperaturinducerade skalv i samband med deponering av bränslekapslar. Det seismiska nätet förväntas ge detaljerad kunskap om den naturligt förekommande seismiciteten i Forsmarksområdet, bidra till detaljering av den strukturgeologiska platsmodellen samt bidra till ökad förståelse av spänningsfältet i Forsmark. Vidare planeras nätet ingå i systemet för förebyggande säkerhetsarbete och effektiv framdrift av anläggningsarbetena. SKB utreder för närvarande omfattningen av det lokala signalbruset så att instrument med adekvat känslighet kan handlas upp och installeras. Nätverket beräknas kunna vara i full operativ drift några år före byggstart.

14.4.3 Stora sprickor

Nuläge

Konstruktionsförutsättningar kopplade till stora sprickor avser potentiella rörelseplan som är så stora och har sådana egenskaper att de vid seismisk händelse skulle kunna skada en kapsel genom skjuvning. Det finns för närvarande inte någon utarbetad metodik för att med säkerhet bestämma storleken av dessa sprickor. Därför gäller fortsättningsvis FPI-kriterierna för identifiering av potentiellt stora sprickor vid lokalisering av ett deponeringshål (Munier 2010), se även avsnitt 26.8. Med FPI menas Full Perimeter Intersection, det vill säga en spricka eller sprickzon som kan följas runt hela tunnelperiferin. FPI-kriterierna utgörs av FPC (Full Perimeter Criterion) respektive EFPC (expanded FPC, som avser sprickor som skär minst fem deponeringshål men inte deponeringstunneln) vars respektive innebörd framgår av figur 14-3.



Figur 14-3. Illustration av FPI-kriteriernas innebörd. A och B är två FPI-objekt av vilka A inte påverkar deponering, medan B förhindrar deponering. C skär minst fem deponeringshål, vilket enligt EFPC innebär att de inte får användas för deponering (från SKB 2010j).

Identifiering av en spricka eller sprickzon som kan följas runt hela tunnelperiferin (FPI) är i praktiken en ren karteringsuppgift. Det tillämpliga kriteriet FPC bedöms därför kunna kontrolleras med stor säkerhet oberoende av brytningsmetod. EFPC är svårare att kontrollera eftersom sprickorna inte kan identifieras vid tunnelkarteringen. Det förutsätter därför en integrerad detaljundersökningsmetodik med tillämpning av såväl direkta mätmetoder i tunnlar och pilothål som indirekta metoder (såsom geofysik och hydrauliska mellanhålmätningar).

FPC exkluderar dock alla sprickor ner till i storleksordningen en tunneldiameter. Eftersom den geometriska storleken behöver vara i storleksordningen tio gånger större för att en kritisk skjuvning ska kunna inträffa, är kriteriet konservativt i den meningen att även acceptabla deponeringspositioner kan bli exkluderade. Det finns därför anledning att försöka vidareutveckla metodiken för identifiering och karakterisering av de stora sprickorna så att deras inverkan på deponering i högre utsträckning kan baseras på verkliga egenskaper och i mindre grad på FPI-kriteriet. Strategin för denna metodik presenterades översiktligt i SKB (2010j) och inbegriper användning av volymavkännande undersökningsmetoder, såsom geofysik (seismik, radar och resistivitetsmetoder) och hydrauliska interferensdata. Erfarenheter från SKB:s samarbete med Posiva rörande test och utvärdering av metoder för att identifiera stora sprickor i Onkalo beaktas.

Program

Undersökningar för att identifiera och karakterisera stora sprickor kommer att genomföras i två parallella tunnlar respektive två tillkommande kärnborrhål i anslutning till nya underjordsdelar i Äspölaboratoriet. Tunnlar och kärnborrhål kommer att ha inbördes avstånd på cirka 40 meter, vilket motsvarar avståndet mellan två deponeringstunnlar. Syftet är att prova, utvärdera och vidareutveckla undersöknings- och modelleringsmetoder för bestämning av stora sprickor enligt ovan.

Det planerade arbetet innefattar i det första steget mätningar i tunnelsystemet med radar, seismik och resistivitetsmetoder. Dessa integreras, tillsammans med utförda hydrauliska interferenstester i pilotborrhål för tunnlar, med den etablerade strukturmodellen från den aktuella bergvolymen. Genomförd tunnelkartering ger data om sprickor eller sprickzoner som kan följas runt hela tunnelperiferin. Resultat från hydrauliska tester i sonderingsborrhål som utfördes vid tunneldrivningen förväntas utgöra ett kompletterande underlag rörande fördelningen av transmissivitet i enskilda sprickplan. Det kan därför användas för att reducera risken att hydrauliskt felbedöma en potentiellt stor spricka (se även avsnitt hydrogeologi ovan).

I en efterföljande testkampanj kommer de två ovan nämnda kärnborrhålen att borrar från en av de undersökta tunnlar. I dessa borrhål genomförs undersökningar, av motsvarande slag som de som gjordes i tunnlar, och integrerad modellering med fokus på stora sprickor. De två testkampanj-

jerna motsvarar sammantaget en viktig del av den undersökningssekvens som ingår i den nämnda strategin. I ett avslutande steg borrar ett hål genom bergvolymen för att testa uppställda hypoteser om modellerade strukturers geometri och storlek.

Programmet om stora sprickor fokuseras huvudsakligen på sprickplanens storlek samt de underliggande egenskaperna som kan utgöra indikatorer för storleken. Till viss del kommer man också att studera strukturernas hydrauliska och mekaniska egenskaper för att bättre kunna bestämma risken för att det verkligen blir en rörelse i stora sprickor.

Platsspecifika förhållanden styr hur metodiken för val och verifiering av deponeringspositioner kommer att tillämpas i Kärnbränsleförvaret. Fortsatt utveckling förutses därför i samband med de integrerade tester av bergutbyggnad och deponering som planeras bli genomförda i Äspölaboratoriet och i Forsmark. Det långsiktiga målet är att bestämningen av stora sprickor kring deponeringspositioner i högre utsträckning ska baseras på verkliga egenskaper och i mindre grad på FPI-kriteriet.

14.4.4 Datasystem för detaljundersökningar

Nuläge

Funktionella datasystem är en förutsättning för effektivt och kvalitetssäkert genomförande av detaljundersökningarna. Olika system och program för datainsamling, datalagring, modellering, visualisering och presentation kommer att användas. Behovet styrs främst av de undersöknings- och modelleringsmetoder som kommer att användas. Utifrån detta har krav som ställs på datasystem under slutförvarets uppförande identifierats, och utifrån detta har också behov av nya eller förbättrade funktioner identifierats. Detta har i sin tur lett fram till en plan som inbegriper såväl framtagning av nya datasystem som vidareutveckling av befintliga.

Utvecklingen och anpassningen av datasystem görs med beaktande av SKB:s generella krav avseende utveckling av datasystem, rutiner för informationslagring och krav på informationssäkerhet. Vid val av datasystem bör tillgängliga system på marknaden väljas före egen utveckling om de bedöms uppfylla de funktionella kraven i tillräcklig omfattning.

Nedan sammanfattas de utvecklingsinsatser som planeras för att detaljundersökningarnas behov ska tillgodoses.

Program

SKB:s nyligen framtagna tunnelkarteringssystem, se avsnitt 14.4.2, kommer att vidareutvecklas, bland annat baserat på de erfarenheter som gavs när det användes vid Äspölaboratoriets utbyggnad. Fortsatt utveckling kommer också att göras av befintligt system för borrhålskartering, Boremap.

Datasystem för undersökningar och monitorering kommer att moderniseras och vidareutvecklas. En viktig aspekt gällande grundvattenmonitoreringen under bygge av slutförvarets tunnlar är att observationer som påverkar byggprocessen och är relaterade till beslut när intressenten inom acceptabel tid. Detta ställer krav på såväl rationell datahantering som på lämpliga visualiseringstekniker för olika typer av primärdata med samtidig redovisning av tunnelgeometrier och aktuell tolkning av geologiska förhållanden.

En modelldatabas som stöder en enhetlig, spårbar och sökbar hantering av befintliga och kommande modeller och modellkomponenter kommer att tas fram. Den nuvarande primärdaten, Sicada, kommer att vidareutvecklas för att uppfylla krav från detaljundersökningarna.

Programvara och tillhörande databas för det geografiska informationssystemet GIS kommer att kompletteras och ett gränssnitt för webbpublicering av GIS-data tas fram.

Det nuvarande modelleringsprogrammet för geologisk modellering, RVS, uppfyller inte till fullo detaljundersökningarnas behov. Utredning pågår för att komma fram till om programmet behöver bytas ut eller om det ska vidareutvecklas och ett kompletterande system tillföras. Nuvarande modellkoder för grundvattenflödesmodellering, se 26.4.1 Ythydrologi och ytnära hydrogeologi och 26.4.2 Hydrogeologi i det djupa berget, behålls och vidareutvecklas.

System för påverkansanalys som omfattar bearbetning, presentation och tolkning av data från hydrogeologisk, hydrologisk, vattenkemisk och ekologisk monitoring finns i dagsläget inte. Systemet ska kunna användas för att identifiera och kvantifiera förändringar av nyckelparametrar i ytsystemet. Det ska även kunna användas för att särskilja antropogent påverkade variationer och trender, till följd av uppförande och drift av Kärnbränsleförvaret, från naturliga variationer och trender inklusive sådana som härrör från annan antropogen påverkan. Mot identifierade systemkrav genomförs en utvärdering av befintliga mjukvaror på marknaden. Därefter beslutas om behovet ska lösas genom att införskaffa färdig mjukvara eller om egen mjukvara behöver utvecklas.

Utvecklingen av gränssnitt har inletts avseende mjukvara för modellering av hydrogeokemi. Detta berör programmen DarcyTools och Pflotran som är avsedda att användas för reaktiv transportmodellering med tillhörande visualisering i tre dimensioner. Befintlig programvara för massbalansanalys, multivariatanalys och blandningsmodellering kommer att anpassas för nya tekniska krav.

Ett antal kommersiella verktyg används i nuläget för modellering av bergmekanik. Dessa program kan sannolikt behållas, men måste utvecklas för att integrera de olika verktygen och automatisera arbetet.

14.5 Utförandemetoder och byggnadsmaterial

14.5.1 Injektering

Nuläge

I Fud-program 2010 redogjordes för fintättningsprojektet som innebar att en 80 meter lång tunnel, benämnd Tass-tunneln, byggdes i Äspölaboratoriet på 450 meters djup. Huvudsyftet var att visa att berget på detta djup kan tätas så att kravet på begränsat inflöde till återfyllningen kan uppfyllas. Två olika injekteringsmaterial användes, dels ett av SKB och Posiva framtaget cementbaserat bruk med pH lägre än 11,0 vid lakning på härdat bruk, dels Silica sol.

I Fud-program 2010 redogjordes för att den injekteringsteknik som SKB behöver ska:

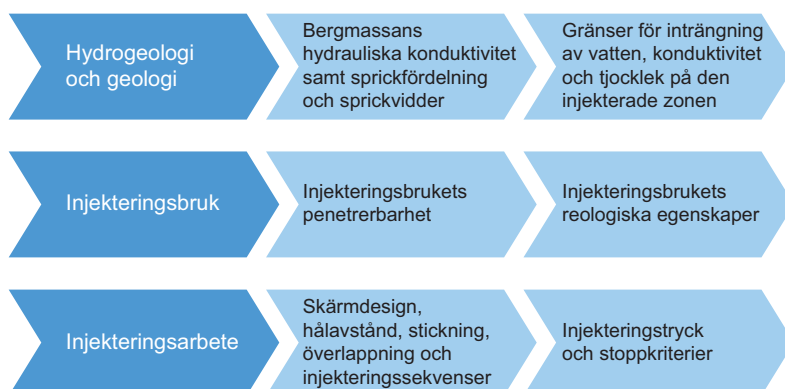
- Uppfylla de krav som är relaterade till långsiktig säkerhet.
- Klara de specifika tätningsscenarioer som är betingade av platsens hydrogeologiska förutsättningar.
- Möta kraven på kvalitetssäkrat och effektivt genomförande.

SKB har sedan en längre tid både följt och bidragit till forskning inom injekteringstekniker. Det gäller både karakterisering, material och dess beteende under injektering (penetration, filtrering etc). De senaste årens forskning har bland annat gett en fördjupad förståelse om injekteringsprocessen och hur injekteringsbruket sprider sig i berget. En metodik har utvecklats som möjliggör att i realtid styra injekteringsprocessen, Real Time Grouting Control (RTGC) och sätta stoppkriterier utifrån brukets spridning i berget. Injekteringen av ett borrhål kan anses avslutad när bruket har skapat den önskade storleken på den runt tunneln omgivande zonen. Stoppkriteriet kan vara att flödet minskar under en nivå, att en förutbestämd bruksmängd pumpats in i hålet eller att en viss tid förflutit. Det sistnämnda avser bekräftelse av torra hål. Metodiken medger möjligheter att optimera processen och inte injektera längre tid än vad som krävs. Den möjliggör också att kontrollera hydraulisk vidgning eller propagering av sprickor i berggrunden under injekteringsförloppet. Ett aktuellt exempel baserat på injekteringsarbeten i Citytunneln under Stockholm redovisades av Tsuji et al. (2012) och Stille (2012). Detta har analyserats och dagens injekteringskunskap har sammanställts från karakterisering till acceptans av färdigt arbete, se figur 14-4. Några nyckelfrågor lyftes fram som måste beaktas i planering för och genomförande av injektering:

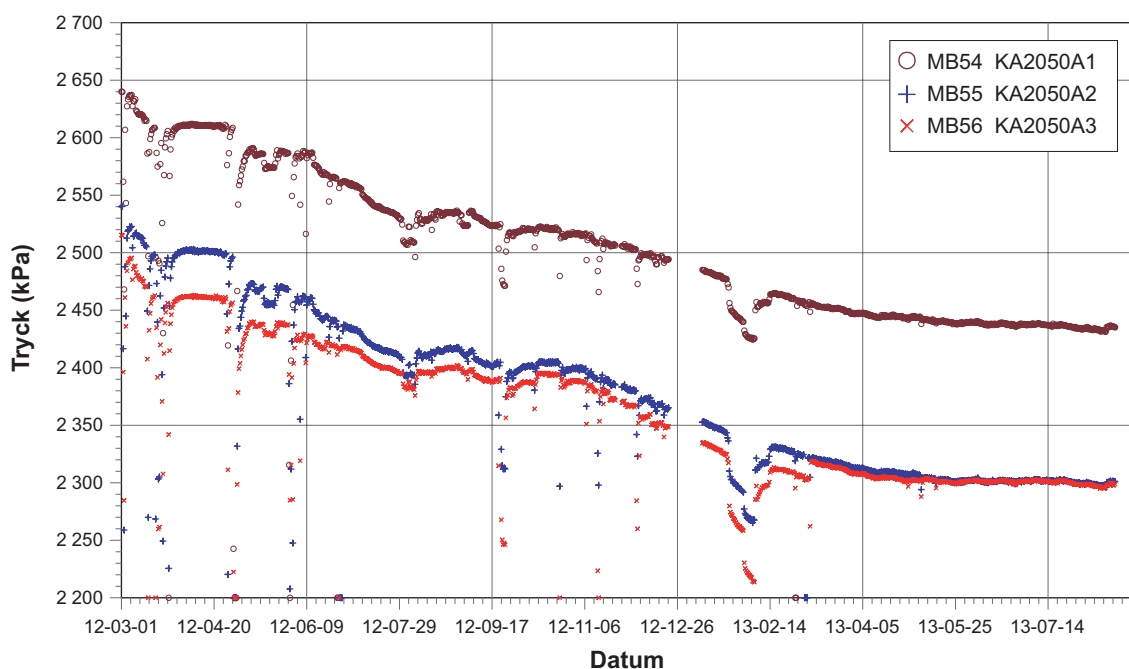
- Karakterisering av bergets hydrauliska egenskaper och hur det hydrauliska systemet reagerar på tunnelarbetena är en osäkerhet som måste följas upp under tunneldrivningen.
- Brukets egenskaper vid laborativ provning är inte alltid desamma som vid injektering. Små variationer i egenskaper hos tillsatsmedel eller blandningsförfarande kan ha stor påverkan på slutresultatet. Noggranna kvalitetsrutiner och dokumentation av använt material och blandningsförfarande är viktigt. Ett forskningsarbete indikerar att ultraljudsmätning på flödet till injekteringsmanschetter skulle kunna bidra till ökad kvalitetskontroll av injekteringsbrukets reologiska egenskaper (Rahman 2013).

- Befintliga modeller för inre erosion av bruket och återflöde till tunneln är konservativa, varför utflöde av bruk till tunneln måste observeras noga under injekteringsarbetet.
- Uppföljning med Real Time Grouting Control ska användas för att kontrollera och vid behov uppdatera prognoser över bedömda sprickvidder och bruksspridning. Detta är en av osäkerheterna på grund av troliga heterogeniteter i det hydrauliskt konnekterade spricknätverket.

Erfarenheterna från fintättningsprojektet låg till grund för projektering av injekteringsarbetena inför Äspölaboratoriets utbyggnad, se avsnitt 14.3. I det projektet sattes krav på en maximal tryckavsänkning på 50 meter i stället för ett inläckagekrav. Rutiner etablerades så att kontrollen av täthet blev en integrerad del av byggkontrollen där även mätning av inläckage ingick, se avsnitt 14.3. Genom integreringen med projektörens ansvar för injekteringsstrategin och en byggkontroll med många observationsmöjligheter i drivningscykeln uppfylldes kravet på maximal avsänkning, se figur 14-5. Teknik och rutiner för byggkontroll avseende injekteringsarbetet och styrning mot krav från projekteringen fungerade bra i löpande entreprenadarbete i detta projekt.



Figur 14-4. Översikt av de viktigaste aspekterna i projektering och genomförande av injektering (Stille 2012).



Figur 14-5. Avsänkning under byggtid (mars till och med december 2012) registrerad i Äspös HMS-system i observationshål KA2050A. De tre kurvorna representerar tre avmanschetterade mätsektioner i borrhålet som är borrarat från nivån ovanför utbyggnadsområdet. Den övre kurvan är mätsektion närmast utbyggnadsområdet på 400-meters nivån. Störningar i kurvorna är orsakade av byggaktiviteter, främst borrhåning för injektering. Totala avsänkningen är cirka 15 meter.

Program

Metod och strategier för injekteringsarbetet och dess kvalitetssäkring behöver vidareutvecklas och anpassas för de olika krav och situationer som kan förväntas vid bygge av Kärnbränsleförvaret.

SKB avser att fördjupa studien av dokumenterade injekteringsresultat från Äspölaboratoriets utbyggnad med efteranalys av injekteringsdata för att vidareutveckla strategin att styra injekteringsarbetet för Kärnbränsleförvaret med Real Time Grouting Control. En viktig komponent i detta är mer rationell mjukvara i injekteringsutrustningens logger. SKB har samverkat med andra aktörer i bergbyggarbranschen i denna fråga, vilket stimulerat ledande maskintillverkare av injekteringsutrustning att uppdatera mjukvaran i loggerutrustningen för bättre information om injekteringsförloppet direkt till operatören.

14.5.2 Berguttag

Nuläge

I Fud-program 2010 redovisades att SKB har valt konventionell borrhning/sprängning som metod för berguttag för Kärnbränsleförvaret. De väsentligaste fördelarna med borrhning/sprängning är hög flexibilitet, mogen teknik och jämförelsevis låg kostnad, inte bara för själva berguttaget utan också för efterföljande arbeten med återfyllning. Metoden kan lätt justeras för olika bergförhållanden, genom att tunnelform och sprängdesign anpassas till rådande krav och platsförhållanden.

I samband med Äspölaboratoriets utbyggnad tillämpades erfarenheterna från berguttaget för fintätningstunneln i Äspölaboratoriet (Karlzen och Johansson 2010). De uppnådda resultaten omformulerades i krav till förfrågningsunderlag och tekniska specifikationer inför upphandling av bergentreprenaden. Detta innefattade även föreskriven sprängplan (borr- och laddplaner) för de olika tunnelareorna. Normalt inför upphandling av borrentreprenad efterfrågas förslag på sprängplan. SKB utgick emellertid från de positiva erfarenheterna från tidigare tunneldrivning i Äspölaboratoriet avseende konturhållning och minimering av sprängskador. I sammanfattning omfattade kraven i förfrågningsunderlaget:

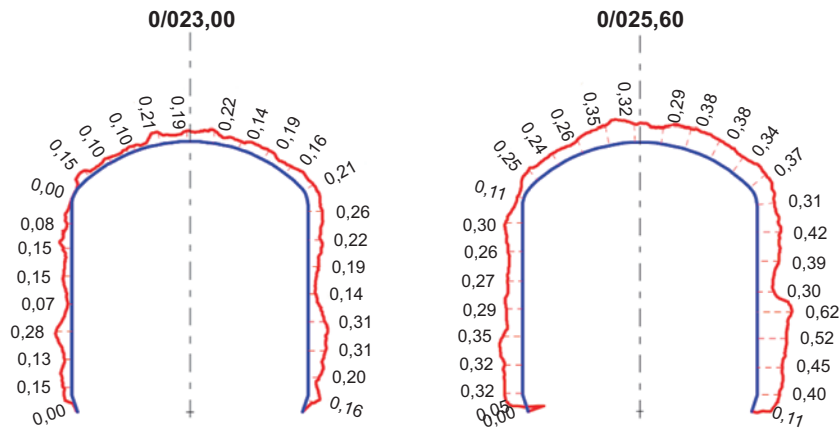
- Krav på konturhållning, vilket i sin tur satte krav på borrhutrustningen.
- Krav på laddningskoncentrationer. Till skillnad från tidigare arbeten där patronerade sprängämnen föreskrivits i konturen för att säkerställa föreskriven laddningskoncentration medgavs nu strängemulsion även i konturen, eftersom detta är det vanligaste vid normal tunnelproduktion. Därmed skapades förutsättningar för att testa hur väl krav på begränsningar i sprängskadezon kan uppnås i mer industrialiserad tunnelproduktion.
- Krav på precision i tändare.
- Krav på borr- och laddutrustningarnas loggersystem.
- Krav på entreprenörens egenkontroll.
- Dokumentationskrav.
- Entreprenörens ledningssystem.

Före byggstart gjordes en genomgång av entreprenörens kontrollplaner och checklistor för tunnelarbetena för att säkerställa egenkontroll och dess dokumentation.

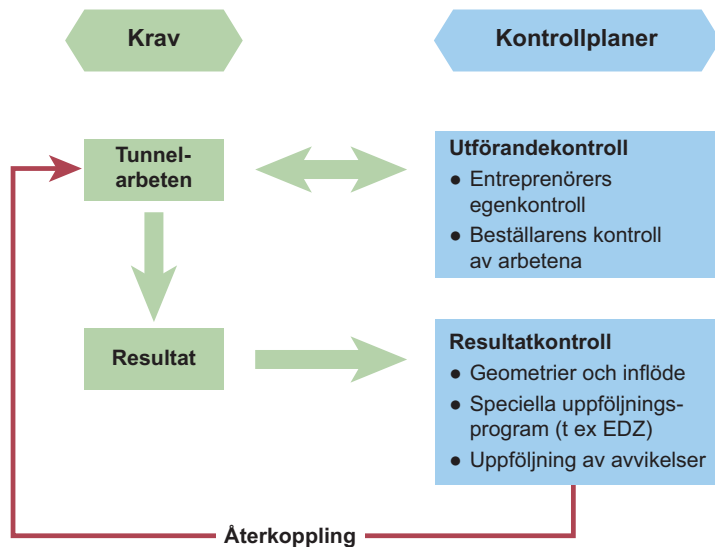
Tunneldrivningen utfördes i huvudsak under 2012 och färdigställdes med bergförstärkning och inredning under första tertialet av 2013. Konturhållning ligger i stort sett inom angivna krav utom i del av höger vägg, se figur 14-6.

Program

Erfarenheterna från de berguttag som gjorts under mer konventionella produktionsförhållanden i samband med Äspölaboratoriets utbyggnad är positiva med avseende på de krav som återfyllningen ställer på tunnelkonturen. Principerna för hur kontroll gjordes mot ställda krav visas i figur 14-7. Utförandekontrollen omfattade dels entreprenörens kontrollplaner och checklistor, dels SKB:s kontroll av att dessa procedurer följdes och att erforderlig dokumentation lämnades in löpande.



Figur 14-6. Exempel på uppföljning av utförd tunnelarea mot ställda krav. Blå kontur; teoretisk sektion. Röd kontur; utförd kontur. Bilden till vänster är i början av en salva, till höger i slutet av samma salva. Mått anger överberg i meter. Felborrning i höger vägg leder till lokalt önskat överberg.



Figur 14-7. Huvudprincipen för kvalitetssäkringen av tunnelarbetena i samband med Äspölaboratoriets utbyggnad.

Resultatkontroll kunde göras efter injekteringsarbeten och efter sprängning där färdig kontur kunde observeras. Med stöd av det fotogrammetriska hjälpmedlet för tunnelkartering, se avsnitt 14.4.2, kunde även areakontroll av tunneln göras inom mindre än ett dygn efter sprängning, vilket möjliggjorde en löpande återkoppling till entreprenören avseende hur väl han innehöll krav på kontur, se figur 14-7.

Kontroll av sprängskadizonens omfattning, speciellt i golvet, kan inte utföras förrän tunneln är färdigsprängd, varför ett separat projekt har initierats. Projektets viktigaste komponenter avser:

- Kravformuleringar.
- Strategier och kontrollmetoder för att minimera sprängskadizonen.
- Krav på verktyg för att verifiera sprängskadizonens omfattning och hydrauliska egenskaper.

Projektets mål är att definiera och utveckla krav, strategier och metoder som behövs för projektering, upphandling av bergentreprenader och uppförande av Kärnbränsleförvaret. Detta avser bergschakt till den omfattning som behövs för att planera och styra bergarbetena vid uppförandet av Kärnbränsleförvaret, samt för att verifiera initialtillståndet avseende utbredning av sprängskadizonen (EDZ).

Kraven på utförande och kontroll, samt strategier för kvalitetssäkringen, ansattes enligt beskrivning ovan i samband med projektering, upphandling och genomförande av bergentreprenaden för Äspölaboratoriets utbyggnad. En cirka 50 meter lång nisch med dimensioner som en deponeringstunnel kommer att undersökas med avseende på sprängskador i golvet.

Den föreslagna strategin för verifiering av sprängskadezonens omfattning bygger på följande principer och metoder:

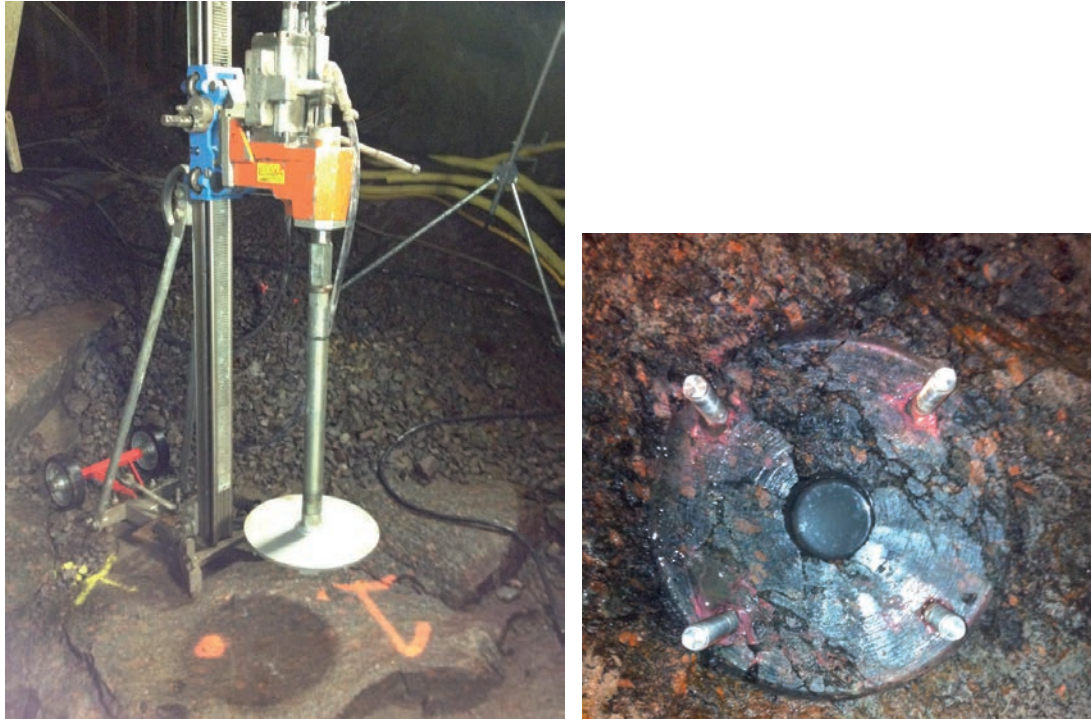
- Verifiering av att utförandet följer krav på borrhning, laddning och upptändning med dokumentation och analys av avvikelser.
- Areakontroll för uppföljning av att toleranser i konturhållning innehålls.
- Uppföljning med geofysiska metoder på tunnelgolvet efter sprängning. Framst högfrekvent markradar, men möjligen även geoelektriska metoder kommer att användas.
- Kartering av tunnelgolvet för kompletterande okulär bedömning av sprängskadornas omfattning.
- Upprättande av en modell med tunnelgolvet topografi, sprickighet och bedömd omfattning på sprängskadezonen.
- Hydraulisk karakterisering av sprängskadezonen i korta borrhål (1–2 meter) med injektionstester.
- Modellerings av sprängskadezonens transmissivitet.

SKB har under 2012 genomfört pilottester för metoder och utrustningar i en nisch i Äspölaboratoriet. Då togs specialmanschetter fram för karakterisering av sprängskadezonens hydrauliska egenskaper. Eftersom sprängskadezonen bedöms vara grund utgick designen av manschetter från att kunna mäta direkt under tunnelgolvet. En borrhålsförlängare togs fram i form av en platta med rör som bultas på planslipad yta runt borrhålet (diameter 150 millimeter), se figur 14-8. Några varianter av manschetter togs fram, med en respektive två mätsektioner. Loggerutrustningen har byggts på en liten vagn tillsammans med gasflaskan för att trycksätta manschetter, detta för att lätt kunna flyttas på ett ojämnt sprängt golv, se figur 14-9. Testen i nischen i Äspölaboratoriet var en Site Acceptance Test av utrustningen, se avsnitt 15.1.2 Allmänt om framtagning av maskiner och utrustningar, och avsåg inte att karakterisera sprängskadezonens hydrauliska egenskaper. Ställda krav på utrustningen har uppfyllts, bland annat:

- Utrustningen ska vara dimensionerad för absolut tryck upp till cirka 4 000 kilopascal (kPa).
- Det ska finnas ett dubbelmanschettsystem för det aktiva hålet och ett enkelmanschettsystem för observationshålet. I det aktiva hålet ska det vara möjligt att göra mätningar i sektioner på 100 och 200 millimeter, samt mellan enkelmanschett och borrhålsbotten.
- Utrustningen ska klara att göra sektionsvisa bestämningar av transmissivitet i intervallet $5 \cdot 10^{-10}$ till $5 \cdot 10^{-7}$ m²/s. Detta innebär att om tryckstörningen är 500 kPa blir flödesintervallet 1 till 1 500 milliliter per minut.
- Utrustningen ska även klara att mäta utflöden före injektionsstart.

Mätning och analys av sprängskadezonens omfattning och hydrauliska egenskaper i en nisch från Äspölaboratoriets utbyggnad kommer att utföras under 2013 och ligga till grund för bedömningen om ytterligare utveckling av krav och styrning av bergschaktarbetena kommer att behövas.

SKB bevakar teknikutveckling avseende andra metoder än borrhning/sprängning. Det har skett en snabb teknikutveckling av mekaniserad bergbrytning, bland annat inom tunnelborrmaskiner (TBM). Denna utveckling har delvis drivits av krav från gruvinindustrin, vilket medför att det i dag finns TBM-teknik som medger större flexibilitet vad gäller kurvradie etc, samtidigt som avverkningskapaciteten ökar med starkare motorer. Sågning med diamantwire har ökat i komplexa anläggningsprojekt. SKB avser att utvärdera hur dessa tekniker skulle kunna utnyttjas för att erhålla jämnare sula i deponeringstunnlar.



Figur 14-8. Vänster: Diamanttrissa till planslipning av golvet runt ett borrhål. Höger: Planslipat golv runt borrhål innan borrhålsförlängaren bultas fast i golvet. Notera även sprängskadesprickorna.



Figur 14-9. Test av utrustning för karakterisering av sprängskadezonens hydrauliska egenskaper. Till vänster ses borrhålsförlängaren (A) för vatteninjektering i det aktiva hålet. Injekteringsmanschetten (B) är förankrad i borrhålsförlängaren i nivå med bergytan. I mitten ses manschettsystem installerat i ett observationshål (C). Till höger ses vagnen med injektionssystem och datainsamlingsystem.

14.5.3 Bergförstärkning

Nuläge

Bergförstärkning av ett förvars tunnlars kan vara nödvändigt ur arbetarskyddssynpunkt. Den konventionella förstärkningsmetoden i tunnlars i Skandinavien är en kombination av bult och sprutbetong. Bultning kan vara selektiv för att säkra enstaka block, eller systematisk för att bidra till valvverkan. Sprutbetongen kan fungera som säkring av mindre block i goda bergförhållanden tillsammans med bult, eller enbart sprutbetong. Bultar försedda med bricka samverkar med sprutbetong. Det finns en konflikt med krav på återfyllning av deponeringstunnlarna, se avsnitt 13.1.2, och systematiskt användande av sprutbetong i tunnlars under nivån för toppförslutning,

I samband med färdigställande av fintätningstunneln, Tass, krävdes även viss bergförstärkning för att säkra arbetarskyddet för kommande experiment i tunneln. Ittner (2011) karterade tunnlarna och analyserade olika instabilitetssituationer. Tre olika situationer fordrade förstärkning:

1. Lokal risk för spänningsinducerad spjälkning i lokalt utstickande berg, orsakat av oregelbundenheter i den sprängda konturen.
2. Potentiellt lösa block som formas av naturliga eller spränginducerade sprickor.
3. Delvis uppluckrat berg i slutet av en sprängsalva, där sprängverkan förutom av bottenladdningen (så kallad primer) också påverkas av den geometriska variation i tunnelkonturen som uppstår på grund av stickning vid salvbörning.

Vid situation enligt punkterna 1 och 3 ovan behövs en ytförstärkning, sprutbetong eller nätning. Detta är frekvent använt i områden med god bergkvalitet i Äspölaboratoriet. Situation enligt punkt 2 åtgärdas med bultning. Ittner (2011) föreslog begränsade förstärkningsinsatser främst inom delar av tunneltaket i Tass-tunneln. Större delen av tak- och väggytorna ingår i det systematiska bergunderhållsprogrammet i Äspölaboratoriet med återkommande inspektion och skrotning (nedmejsling) av lösa block.

Program

Förstärkningarna i Tass-tunneln i Äspölaboratoriet som utfördes 2011 ingår i det löpande bergunderhållsprogrammet och kommer att följas upp som underlag till beslut av åtgärder i Kärnbränsleförvarets deponeringstunnlar.

Bergförhållandena i Forsmark kan behöva mer systematisk förstärkning på grund av andra berg- och spänningsförhållanden. SKB avser bevaka utvecklingen av främst maskinell utrustning för nätning, där LKAB driver teknikutveckling för behoven i Kirunagruvan. Även samarbete med Posiva planeras i denna arbetarskyddsfråga.

14.5.4 Material med lågt pH

Under ett visst djup i Kärnbränsleförvaret får endast så kallade låg-pH-material användas. Detta krav påverkar val av injekteringsmedel och de material som kan användas vid bergförstärkning, i första hand sprutbetong.

Nuläge

En negativ erfarenhet i samband med injekteringsarbetena i entreprenaden för Äspölaboratoriets utbyggnad var den långa härdningstiden för det låg-pH-injekteringsbruk som även användes 2007 i fintätningprojektet i Tass-tunneln.

En nyligen genomförd studie, som kommer att publiceras, visar att Kärnbränsleförvarets barriärfunktion inte påverkas även om vanlig cement används ner till åtminstone 200 meters djup. Därför planeras nu att vanlig cement används vid uppförandet av förvarets tillfarter ner till denna nivå.

Program

SKB har installerat 20 bergbultar med låg-pH-bruk i försöksnischen. Bultarna kommer att följas upp under en tioårsperiod. Speciellt intressant är det att undersöka beständigheten hos bruket och eventuell förhöjd korrosion av bultarna på grund av att de är ingjutna med ett bruk med pH på cirka 11. Detta jämfört med vanligt bruk med pH på cirka 12,5.

Begränsade försök med att bestämma korrosion av stål i låg-pH-betong inleddes under 2009 och uppföljningen av dessa försök kommer att pågå under cirka 10 år. SKB är också initiativtagare och sammanhållande för ett internationellt projekt som påbörjades 2008, med syfte att utarbeta en enhetlig metod för att mäta pH-värdet för cementprodukter.

SKB behöver vidareutveckla receptet för låg-pH-injekteringsbruk med acceptabla acceleratorer. Tillsatsmedel som ingår i aktuellt recept för låg-pH-bruket fasas ut från marknaden av tillverkaren. Detta är en vanlig utvecklingstrend inom byggindustrin där nya kemiska produkter introduceras, bland annat inom cement- och betongteknologier. SKB behöver utveckla en mer långsiktig strategi för att vidmakthålla injekteringsrecept som är rationella i utförandeskedet med god penetration och acceptabla härdningstider. De ska vidare ha acceptabel sammansättning utifrån långsiktig säkerhet.

Programmet omfattar även fortsättningsvis uppföljning av försöken i Äspölaboratoriet med bergbult och sprutbetong samt korrosionsförsöken på armeringsjärn. Första provtagningarna planeras under den kommande treårsperioden.

SKB medverkar i bland annat ett branschgemensamt projekt avseende funktionskrav vid underjordsanläggningar med avseende på den kemiska miljön. Det övergripande målet för projektet, som leds av Chalmers tekniska högskola, är att vidareutveckla standarder för att uppfylla funktionella krav på underjordiska anläggningar med avseende på grundvattensammansättning och undermarksanläggningars atmosfär.

15 Tekniska system

Detta kapitel omfattar teknikutveckling av maskiner, utrustning och processer för hantering av kapslar, buffert- och återfyllningsmaterial, etc vid drift av Kärnbränsleförvaret och Clink.

15.1 Krav och förutsättningar

15.1.1 Övergripande planering och styrning

Projekteringen av Kärnbränsleförvaret befinner sig nu i systemprojekteringskedet. Senare övergår detta i ett detaljprojekteringskede och därefter kan byggskedet inledas när nödvändiga tillstånd för byggstart finns.

Systemprojekteringen utförs som en sammanhållen projektering som omfattar hela Kärnbränsleförvaret och det är i princip en översyn och detaljering av layout D som ingick i ansökningarna 2011. Under detaljprojekteringskedet sker en uppdelning mellan de olika delarna av anläggningen med hänsyn till när underlag för respektive del behöver finnas framme inför byggstart. Delar som ligger tidigt i byggskedet är iordningställande av byggarbetsplatsen samt byggandet av ramp och skipschakt och de hjälpfunktioner som detta kräver.

Tiderna för detta framgår av kärnbränsleprogrammets huvudtidsplan som översiktligt presenterats under avsnitt 2.3 Handlingsplan för använt kärnbränsle.

Under systemprojekteringskedet sker omfattande logistikstudier för att analysera trånga sektorer i verksamheten och eventuella problemområden. Logistikstudierna är en interaktiv process där olika lösningar för en viss funktion testas för att sedan inarbetas i projekteringsarbetet.

Under systemprojekteringskedet läggs också grunden för Kärnbränsleförvarets framtida överordnade produktionssystem, i vilket olika planerings- och logistikprogram är viktiga verktyg.

15.1.2 Allmänt om framtagning av maskiner och tekniska system

Många av de maskiner, fordon och tekniska system, med mera som kommer att användas i Kärnbränsleförvaret och Clink under den framtida driften för transport av kapslar, buffert- och återfyllningsmaterial etc, kan betecknas som specifika för SKB. Med detta avses maskiner och tekniska system som i dagsläget inte finns att köpa på den öppna marknaden och därför behöver utvecklas. De måste ha hög drifttillgänglighet och kunna samfundera med övriga maskiner och tekniska system samt vara användarvänliga för personalen.

Utveckling och industrialisering av de maskiner och tekniska system som krävs kommer att följa en teknikutvecklingsmodell där man stegvis går igenom olika faser, se figur 15-1. Genom att ställa krav på att maskiner och tekniska system utvecklas i enlighet med faserna i teknikutvecklingsmodellen ökar sannolikheten för att de kommer att uppfylla krav på funktion, tillförlitlighet och på att vara tillgängliga.

Med drifterfarenhet avses hur väl ett tekniskt system presterar när det väl har satts i bruk. Såväl personalens erfarenheter som erfarenheter från underhållsdatabaser kommer att användas för att utöka drifterfarenheten.



Figur 15-1. Generella faser i utvecklingen av maskiner, system och utrustningar.

Konceptfas

I konceptfasen görs design av koncept utifrån de behov och erfarenheter som finns att tillgå antingen internt eller externt. Valet av konceptuell lösning för det tekniska systemet ska baseras på funktionella systemkrav, hög driftsäkerhet, god underhållsmässighet samt låg livstidskostnad. Det sistnämnda omfattar de kostnader som den tekniska lösningen genererar under hela den tekniska livslängden med avseende på drift- och underhållsegenskaper. En personsäkerhetsanalys, riskanalys och riskbedömning genomförs parallellt med den tekniska analysen. Detta görs för att ge låga säkerhetsrisker och tekniska risker vid drift och underhåll av maskiner och tekniska system.

Design- och utvecklingsfas

Design- och utvecklingsfasen innebär att ett val mellan två huvudalternativ för design och utveckling ska göras. I första hand upphandlas tjänsten av en extern leverantör. Om det inte är möjligt eller ekonomiskt försvarbart utförs design och utveckling i SKB:s regi. Innehållet i denna fas skiljer sig åt beroende på vilket av dessa alternativ som väljs.

Väljs en extern leverantör måste en upphandling genomföras. Det innebär en formell process där det är viktigt att underlaget för upphandling är entydigt och att eventuella osäkerheter begränsas. Det är viktigt att krav ställs på funktion och inte på hur den tekniska lösningen ska se ut.

Alternativet att utveckla i egen regi innebär en mer detaljerad utvecklingsprocess. I vissa fall kan det också innebära en ökad flexibilitet, vilket kan vara en fördel om kravbilderna ändras under projektets gång.

Tillverkningsfas

Tillverkningen av tekniska system kan upphandlas av en leverantör både inom design- och utvecklingsfasen och inom tillverkningsfasen. Tillverkningsprocessen kan därför se olika ut beroende på vilken väg man väljer efter avslutad design och utveckling.

I slutet av tillverkningsfasen utförs ett så kallat Factory Acceptance Test. Detta är ett acceptanstest av systemet före leverans till den avsedda driftmiljön.

Ändringshantering innebär att specifikationer som en gång har blivit godkända och validerade och som därefter ändras, måste genomgå förnyad granskning, riskbedömning och validering. För att inte behöva göra om hela valideringen, riskbedömningen och granskningsarbetet har en rutin tagits fram för att hantera detta. När en ändringshantering inträder och specifikationer ändras efter godkänt acceptanstest, måste en hantering enligt denna rutin genomföras. Rutinen för ändringshantering gäller tills att processen, produkten eller det tekniska systemet avvecklas. Rutinen gäller även i konceptfasen och i design- och utvecklingsfasen, men då enbart för de specifikationer som är godkända, det vill säga kravspecifikationer på en högre nivå.

Installationsfas

Syftet med installationsfasen är att verifiera och validera att det tekniska systemet fungerar som avsett i sin driftmiljö, Site Acceptance Test.

För att detta ska kunna genomföras krävs att:

- Det tekniska systemet ska ha godkänts i och med att restpunkterna efter acceptanstest är omhändertagna.
- Utbildning för att använda systemet ska vara framtagen.
- Dokumentation såsom instruktioner och teknisk dokumentation ska finnas framme.

Efter installationsfasen är det tekniska systemet godkänt för drift.

Driftfas

Dokumentation av hur väl det tekniska systemet presterar ska ske från och med den dag det tas i drift för första gången. Uppföljning av drifterfarenheter ska användas för att:

- Under garantitiden stödja verifiering och validering av driftsäkerhetsegenskaperna.
- Ge stöd för uppdatering av planer för förebyggande underhåll.
- Ge stöd för konstruktionsförbättringar.
- Överföra erfarenheter till andra teknikutvecklingsprojekt.

Uppföljning av drifterfarenhet ska som minimum innehålla information om:

- Felaktig funktion.
- Korresponderande felmeddelande i fordon och delsystem.
- Felaktig komponent.
- Felorsak.
- Konsekvens.

Relevant drifterfarenhet ska rapporteras i underhållssystemet och dess databas.

Rutinen för ändringshantering säkerställer att riskbedömningen för det tekniska systemet hålls aktuell och att alla ändringar dokumenteras via systematisk kravhantering.

Avvecklingsfas

Med avveckling avses här avveckling av en maskin eller ett tekniskt system för att sammanställa erfarenheter från driften för utveckling av nästa system, för att kunna återvinna materialet i produkten och för att själva återvinningen eller destrueringen ska ske på ett säkert och ändamålsenligt sätt.

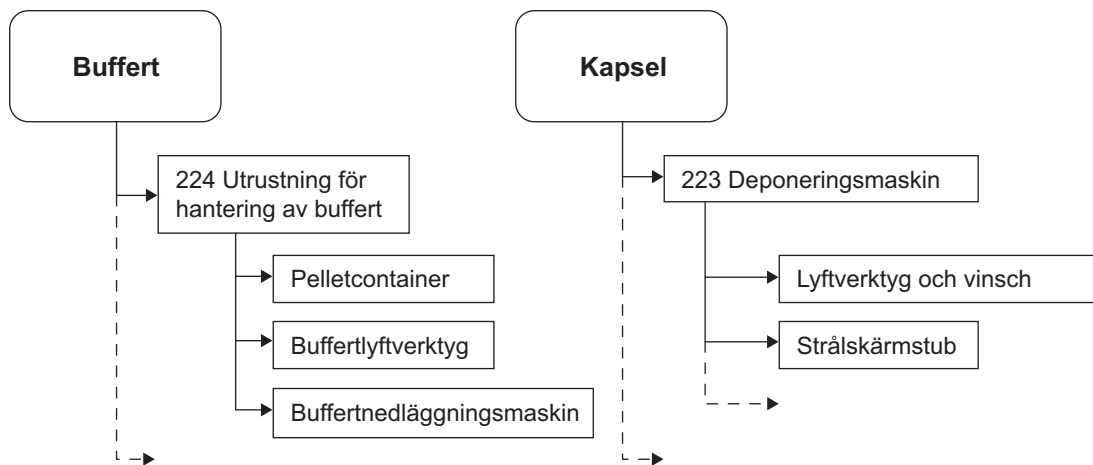
För att avvecklingsfasen av tekniska system ska kunna genomföras på ett säkert sätt krävs att alla risker i samband med avvecklingen kartläggs och utvärderas. Avvecklingen av det tekniska systemet kan göras parallellt med den ordinarie driften eller i och med ett planerat driftstopp. I båda fall krävs god planering.

15.1.3 Utveckling av produktionssystem

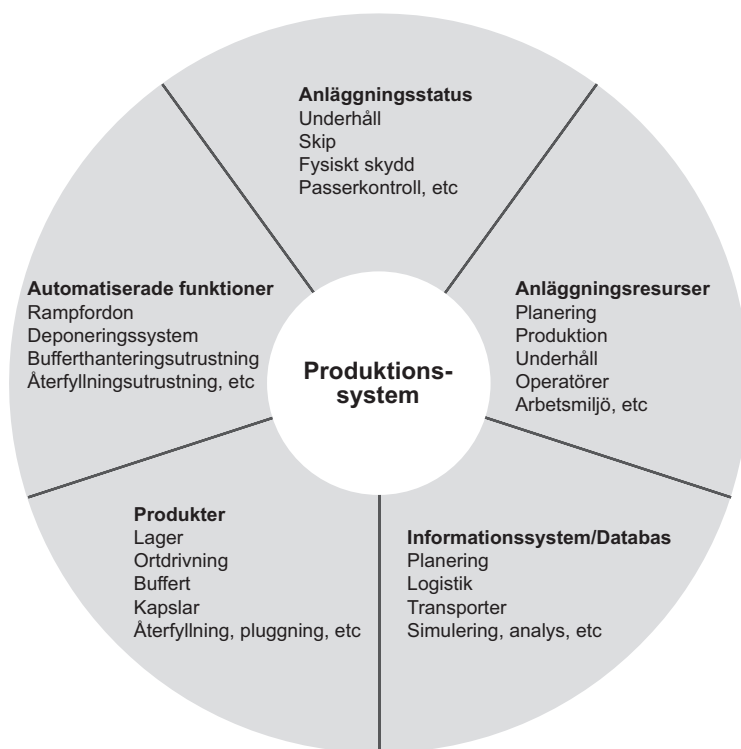
För att skapa en överblick och även kunna dokumentera behovet av maskiner och utrustningar, etc för Kärnbränsleförvaret har en databas upprättats där maskiner och utrustningar har inordnats i systemgrupper i enlighet med praxis inom kärnkraftsindustrin. Systemgrupp 200 omfattar utrustning för mottagning, hantering, förvaring och bergarbete medan systemgrupp 400 omfattar transportsystem med båt, terminalfordon och olika typer av transportbehållare. Det är främst inom systemgrupperna 200 och 400 som det finns behov av en omfattande teknikutveckling.

Arbetet med inventeringen för uppbyggnaden av databasen har pågått under många år. Identifieringen av behovet av maskiner och utrustningar kopplade till systemgrupperna 200 och 400 kommer främst från arbetet med produktionslinjerna. I figur 15-2 exemplifieras detta utgående från produktionslinjerna för kapsel respektive buffert. En av målsättningarna har varit att i första hand hitta standardiserade utrustningar som finns på marknaden, i andra hand undersöka om det är möjligt att modifiera standardkomponenter och i sista hand utveckla egna produkter. Aktuella maskiner och tekniska system ska så långt som möjligt konstrueras utgående från standardkomponenter. Det totala antalet produkter samt när utveckling av dessa bör initieras och avslutas samt kostnader för detta, finns även dokumenterat i databasen för detta.

För att kunna genomföra verksamheten på ett effektivt och säkert sätt krävs ett utvecklat produktionssystem för Kärnbränsleförvaret. Produktionssystemet innehåller i sin tur en rad delsystem som kan övervaka och redovisa anläggningens status, anläggningens resurser, informationssystem, produktstatus samt automatiserade funktioner. Figur 15-3 ger ett exempel på detta.

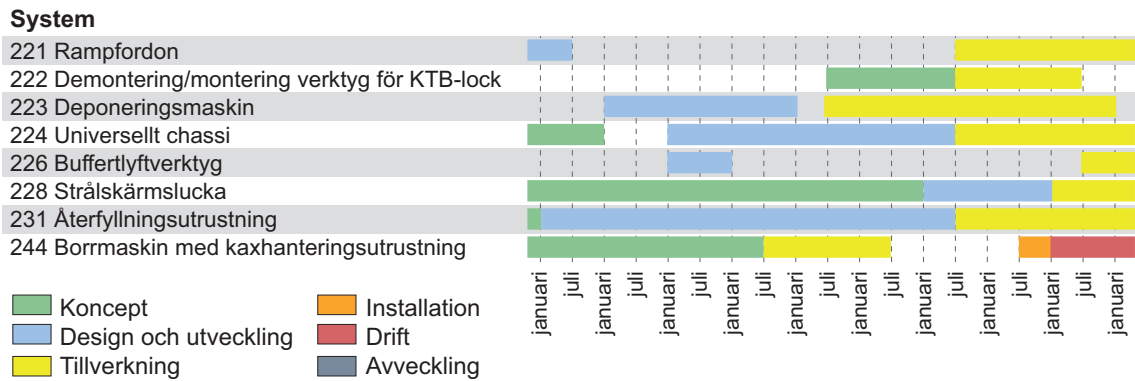


Figur 15-2. Exempel på maskiner och utrustningar som identifieras i produktionslinjen för buffert respektive kapsel.



Figur 15-3. Produktionssystem med hjälpsystem, anläggningens delar och funktioner är en lämplig utgångspunkt för det som kommer att behövas för Kärnbränsleförvaret.

Det totala antalet produkter med fokus på maskiner och utrustningar är större än enbart de produkter som behöver omfattande teknikutveckling. Det totala antalet produkter samt när utveckling av dessa bör initieras och avslutas samt kostnader för detta finns beskrivet i databasen. Figur 15-4 illustrerar översiktligt det som finns i databasen för ett urval av produkter inom systemgrupp 200 och visar framtida aktiviteter. Tidsplanen för genomförandet av dessa aktiviteter kommer givetvis att påverkas av huvudtidsplanen för Kärnbränsleprojektet, se avsnitt 2.3 Handlingsplan för använt kärnbränsle. I databasen ingår faserna koncept, design och utveckling, tillverkning, installation, drift och avveckling och dessa skeden presenteras med olika färgkoder i databasen och figur 15-4.



Figur 15-4. Presentation av innehållet i databasen för maskiner och utrustningar som också översiktligt illustrerar de olika utvecklingsfaserna.

15.1.4 Strategier och aktiviteter för att nå uppsatta mål

Utveckling av SKB-specifika system görs stegvis under flera år, vilket gör att teknikutvecklingen behöver starta långt innan utrustningen behöver finnas på plats. Det går inte heller att bedriva teknikutveckling för alla system och utrustningar samtidigt. Vid fastläggande av tidsplan behöver man förutom att ta hänsyn till gemensamma milstolpar även utjämna resursbehovet över tid för att möjliggöra en ändamålsenlig organisation med rimlig storlek för teknikutveckling.

För verifieringar och valideringar av systemen behövs det i vissa fall prototyper. Delar av dagens teknikutveckling som gäller produkter inom KBS-3-systemet berör därför utveckling samt konstruktion av prototyper. En avvägning måste göras om prototypen ska utvecklas för den slutgiltiga funktionen eller enbart användas till en begränsad del, till exempel i syfte att visa att en viss funktion kan utföras på ett önskat sätt. Ett av de vanligare syftena med att ta fram en prototyp är att få fram och testa en realisering för att minska risken vid framtagningen av den slutliga produkten. Den framtagna prototypen utvärderas och resultatet blir en viktig pusselbit vid kravställning och specificering av den slutliga produkten.

Produkt- och processutveckling syftar till att tidigt i utvecklingen utöver de rent kärnsäkerhetsrelaterade kraven få med kraven på personsäkerhet, driftsäkerhet och underhållsmässighet. Det vill säga att kunna påverka konstruktionen medan det är billigt att införa ändringar. Planeringen bygger på för SKB tillämpbara delar av standarder från USA.

Om den framtagna prototypen uppfyller alla gällande krav kan den industrialiseras och implementeras. I samband med detta måste prototypen analyseras med avseende på till exempel livstidskostnad, funktionssäkerhet och underhållsmässighet. I många fall resulterar dessa analyser i att det är kostnadseffektivt att starta om utvecklingen av den slutliga produkten. Erfarenheterna från prototypen medför att utvecklingen av den slutliga produkten kan genomföras med mindre risk och att många beslut underlättas. Mycket av arbetet med de utförda analyserna kan också användas i arbetet med framtagningen av den slutliga produkten.

Användande av den ovan redovisade metodiken är en viktig del för att säkerställa industrialiseringen av produkten samt dess implementering i den tillhörande processen. Arbetsmetoden medger successiv verifiering av att ett tekniskt system under utveckling uppfyller de specificerade kraven. I samband med leverans genomförs sedan ett acceptanstest som sker i leverantörens miljö. Syftet med testet är att säkerställa att de krav som ställts på konstruktionen uppfylls av det tillverkade systemet.

I installationsfasen utförs ett acceptanstest i driftmiljö samt den provdrift som krävs för att kunna verifiera och validera att det tekniska systemet uppfyller ställda krav. Testet avser att verifiera och validera integrationen av det tekniska systemet med andra system, samt dess funktionalitet i den faktiska produktionsmiljön inklusive lösningar för underhåll.

Det är viktigt att beskriva när i tiden de olika faserna ska genomföras för respektive maskin och utrustning. Detta för att enklare kunna överblicka industrialisering samt implementering av de maskiner och utrustningar inom KBS-3-systemet som exempelvis kräver specialanpassning samt vad de kommande utvecklingsfaserna innehåller.

15.2 Produkter och processer

Merparten av teknikutvecklingen behöver vara genomförd inför fastställande av deponeringssekvensen. I de fall det behövs prototyper måste de finnas framme och deras funktion ha verifierats. Viktiga aktiviteter under den kommande perioden är att:

- Fortsätta med logistikstudier.
- Genomföra designfasen enligt teknikutvecklingsmodellen för bufferhanteringsutrustning, återfyllningsutrustning och transportsystemet för buffert och återfyllning.
- Påbörja utvecklingen av produktionskontrollsystemet.
- Förbereda och påbörja integrationstester.

Integrationstester av buffert, återfyllning och valvplugg gör att prototyper behöver finnas tillgängliga för att transportera och installera buffert och återfyllning. Prototyperna ska tas fram enligt de funktionella krav och myndighetskrav som finns för den typen av produkt. Dessa ska vara CE-märkta om detta bedöms vara nödvändigt, vilket mer eller mindre är en formalitet om teknikutveckling enligt teknikutvecklingsmodellen följs.

Avsnitten 15.2.1 till 15.2.7 utgör kortfattade beskrivningar av de teknikutvecklingsprojekt som pågår och de som behöver genomföras.

Inför upprättande av PSAR och rapporten för säkerhet under uppförande av slutförvarsanläggningen (Suus), se avsnitt 10.3.1, behöver pågående teknikutvecklingsprojekt lämna underlag för uppdatering av produktionsrapporter och systembeskrivningar för i första hand 200-system samt del av 400-system.

För uppdatering av systembeskrivningar och produktionsrapporter för kapsel, buffert och återfyllning behövs även resultat från pågående projekt gällande deponeringsmaskinen, transportsystemet för buffert och återfyllning samt bufferhanteringsutrustning inklusive rampfordonen.

Intensifierade kontakter med tillverkande maskinleverantörer behövs för att etablera kunskap och intresse hos leverantörer gällande de framtida behoven av främst SKB-specifika maskiner och system i Kärnbränsleförvaret. Tillverkning samt konstruktion av de slutliga versionerna av SKB-specifika maskiner och system ska utföras av externa leverantörer i samverkan med SKB, efter genomförd prototyputveckling. Systembeskrivningarna tas fram i samverkan med leverantörer.

Synkronisering av tidsplaner mellan de olika produktionslinjerna och projekteringen av Kärnbränsleförvaret måste göras i relation till utveckling av maskiner och utrustningar. Framtagning av övergripande produktionssystem för de olika processerna ska utvecklas. Dessa produktionssystem ska beskriva hur de olika maskinerna samt utrustningarna (produkterna) ska verka inom de olika produktionslinjerna (processerna).

Detaljprojekteringen kan inledas när design- och utvecklingsfasen för utrustning för hantering och transport av kapsel, buffert och återfyllning är avslutad. Även kontrollprogram måste finnas framtaget liksom utrustning för kontroll av buffert- och återfyllningsinstallation.

Hänsyn måste även tas till planerade fullskaletester av buffert och återfyllning så att prototyputrustning finns tillgänglig och kan användas vid dessa tester, se avsnitt 13.10 Integrationstester.

15.2.1 Logistikstudier

Nuläge

Behovet av logistikstudier beskrevs i Fud-program 2010 och avsåg logistikstudier för hela Kärnbränsleförvaret. Under 2010 genomfördes ett mindre demonstrationsprojekt beträffande logistikstudier för Kärnbränsleförvaret. Syftet med det projektet var att utvärdera arbetssätt och programvara för

logistiksimuleringar. Simuleringarna har gett värdefull information om logistiken vilket har medfört att ytterligare en logistikstudie har påbörjats under 2012 som fokuseras på skipbyggnad, skiphall och omlastningshall i avvaktan på information från slutförvarsanläggningens pågående systemprojekteringskede.

Grundmodellen från demonstrationsprojektet kommer även att utökas till att omfatta fyra deponeringstunnlar för att kunna visa förhållanden under normaldrift och även med bergtransporter. Detta medför att aktiviteter av typen buffertinstallation, deponering av kapslar och återfyllning samt uppförande av valvpluggen ingår i logistikstudierna.

Under hösten 2011 anskaffades även ett planeringsverktyg, som har anpassats till Kärnbränsleförvaret enligt logistikmodellen från demonstrationsprojektet och maskinkontrollsystemet. Alla data som används i logistikstudierna kommer successivt att läggas in i planeringsverktygets databas. Databasen kommer också att användas för maskinkontrollsystemet och produktionssystemet.

Program

Resultaten från logistikstudierna kommer att användas som underlag under systemprojekteringskedet och efterföljande detaljprojektering. Syftet med logistikstudierna är att ta fram underlag för olika typer av beslut under system- respektive detaljprojekteringen av Kärnbränsleförvaret. Projektet ska också användas för att underbygga beslut för när processer, produkter och teknik ska utvecklas och hur det ska genomföras. Detta uppnås via simulering av modeller för delar av eller hela verksamheten för drift av Kärnbränsleförvaret. Även berguttaget under driftskedet samt transporter av kapslar från hamnen i Forsmark och bentonitmaterial från Hargshamn inkluderas i detta. Dessa studier ska också utnyttjas för tids- och resursplanering för den framtida driften av Kärnbränsleförvaret.

15.2.2 Rampfordon

Nuläge

Ett serietillverkat fordon för tunga transporter levererades till Äspö hösten 2010. Under hösten 2012 hade inledande tester av fordonet med en last på cirka 100 ton påbörjats. Lasten utgjordes av en ombyggd avfallstransportbehållare från SFR som kan lastas till önskad totalvikt för att simulera transport av en framtida kapseltransportbehållare med kapsel. Figur 15-5 visar fordonet med last under de inledande testerna i Äspölaboratoriet.



Figur 15-5. Foto av fordon med modifierad avfallstransportbehållare för att simulera framtida transporter av kapseltransportbehållare.

Program

Syftet med tester av rampfordon är att visa om ett serietillverkat tungtransportfordon kan användas som ett rampfordon i Kärnbränsleförvaret. Fordonets prestanda, säkerhet, tillförlitlighet och manöverbarhet är några av de parametrar som kommer att testas och valideras. Projektet omfattar även att tillföra ett mer detaljerat underlag inför uppdatering av PSAR. Detta görs i syfte att förbättra och öka detaljeringsgraden i systembeskrivningen för rampfordonet. Fordonet kommer också att kompletteras med ett navigerings- och positioneringssystem på samma sätt som deponeringsmaskinen.

15.2.3 Deponeringsmaskin

Nuläge

Under den gångna perioden har en stor serie med helt automatiska deponeringar genomförts med deponeringsmaskinen. Testerna har genomförts enligt ett testprogram och eventuella avvikelser och störningar har dokumenterats. I slutet av testserien erhöles mycket stabila förhållanden varför testerna avslutades efter cirka 200 genomförda deponeringscykler. Under testerna konstaterades att det kommer att krävas modifiering av greppverktyget och byte av utrustning av typen gränslägesbrytare. Erfarenheterna av testerna kommer att beaktas i det fortsatta arbetet med deponeringsmaskinen.

Program

Under den kommande perioden kommer arbetet med vidareutveckling av deponeringsmaskinen att inledas. Detta gäller särskilt utveckling av greppverktyget för kapseln, vinsch samt strålskärmsstub. I detta arbete kommer även fortsatt utveckling av strålskärmsluckan att ingå eftersom den samverkar med deponeringsmaskinen.

15.2.4 Transportsystemet för buffert- och återfyllningsmaterial

Nuläge

Arbetet med transportsystemet för buffert- och återfyllningsmaterial har i stort fortgått enligt programmet. Det har fungerat som stöd för tester av återfyllning och för systemprojekteringen av Kärnbränsleförvaret.

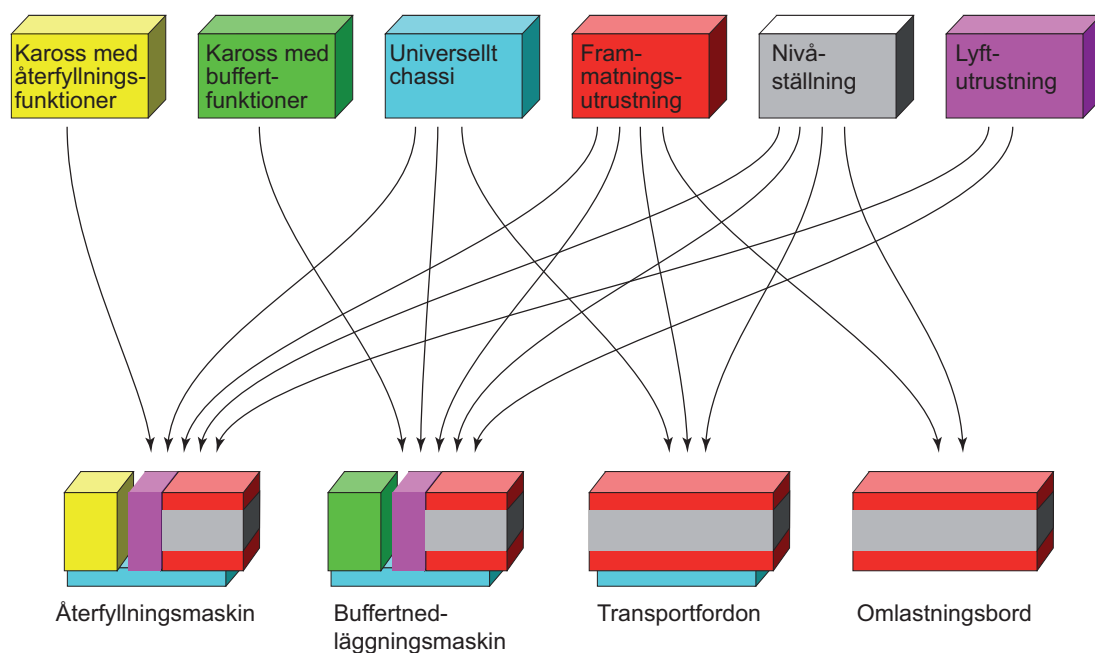
Program

Ett projekt pågår med syfte att ta fram de metoder, utrustningar och fordon som krävs för transport av buffert- och återfyllningsmaterial i Kärnbränsleförvaret. Projektet planeras pågå under perioden 2010–2015. Målet är att utveckla ett funktionellt transport- och hanteringssystem för buffert och material för återfyllning och delvis verifiera detta med prototyper.

Projektet omfattar även att ta fram kompletterande underlag till dokument avseende PSAR, referensverksamhet, referensutformning, anläggningsbeskrivning för Kärnbränsleförvaret och produktionslinjerapporter i syfte att förbättra och öka detaljeringsgraden i dessa.

Utvecklingen kommer att ske i moduler för att dels kunna göra separata verifieringar av modulerna, dels för att skapa ett system som snabbt går att åtgärda genom att byta ut moduler. Ytterligare en fördel är att arbetet i moduler underlättar utveckling, upphandling, underhållskompetens och reservdelshållning.

Den principiella uppbyggnaden av det totala transportsystemet för buffert- och återfyllningsmaterial framgår av figur 15-6. En viktig modul utgörs av ett universellt chassi med drivna och individuellt styrbara hjul och med en hjulbas som medger säker grensling av deponeringshålen. På detta chassi kan andra moduler placeras i form av utrustning för lyft och inplacering av buffertblock och -ringar i deponeringshålen. Avsikten är att även en robot för inplacering av återfyllningsblock samt frammatningsutrustning för lastpallar och pellettankar ska kunna placeras på detta chassi. I systemet ingår även ett transportfordon för lastpallar och pellettankar samt ett omlastningsbord.



Figur 15-6. Illustration av transportsystemets olika moduler. Figuren visar den principiella uppbyggnaden av utrustningarna och vilka moduler som ingår i respektive utrustning.

Omlastningsbordets funktion är att möjliggöra rationell överföring av fyllda och tomma lastpallar och pellettankar till och från transportfordonet i produktionsbyggnaden, skipbyggnad och skiphallen på förvarsnivån. Hanteringen av de enskilda lastpallarna och pellettankarna på dessa platser sker med konventionell gaffeltruck.

Återfyllningsmaskinen, buffertnedläggningsmaskinen samt transportfordonet kommer även att vara försedda med navigations- och positioneringsutrustning.

Återfyllningsmaskinen består av fem moduler: universellt chassi, robot med verktyg för hantering och inplacering av återfyllningsblock, lyftutrustning, frammatningsutrustning samt utrustning för nivåställning. Till detta kommer navigerings- och positioneringsutrustning. Under 2012 påbörjades tester av denna typ av utrustning med en industrirobot samt ett utvecklat verktyg för hantering av återfyllningsblock. Blocken hämtas av roboten från lastpallar som framtagits för att ingå i det framtida transportsystemet. Även en prototyp av frammatningsutrustning av lastpallar har tagits fram och kommer att testas i Äspölaboratoriet. Figur 15-7 visar den utrustning som använts vid testerna med att installera återfyllningsblock med robot i Bentonitlaboratoriet och med utnyttjande av prototyper av de moduler som ingår i transportsystemet för buffert- och återfyllningsmaterial.

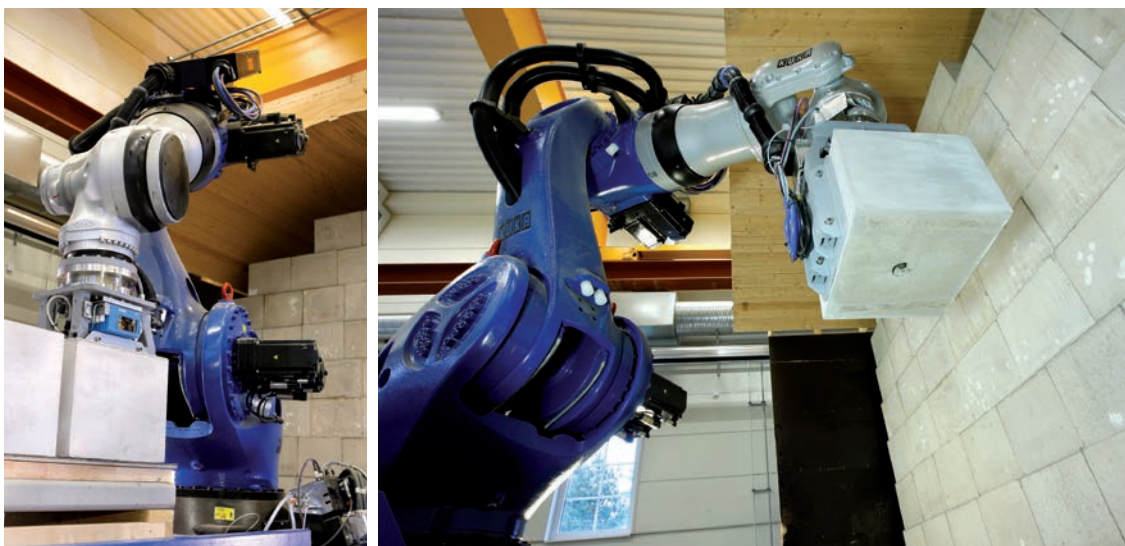
Vid de tester som utfördes hösten 2012 var återfyllningsutrustningen placerad på ett stativ som kan flyttas av transportfordonet för ramptransporter.

I återfyllningsutrustningen ingår även en enhet för placering av pelletter på golvet i deponeringstunneln och mellan återfyllningsblocken och berget. Denna utrustning kommer antingen bli en egen enhet eller ingå som en del av den utrustning på vilken roboten finns installerad.

Maskinen för att lägga ned bufferten består av fyra moduler; universellt chassi, bufferhanteringsutrustning, frammatningsutrustning samt utrustning för nivåställning. Till detta kommer också navigerings- och positioneringsutrustning.

Transportfordon för lastpallar för buffert och återfyllningsblock samt pellettankar består av tre moduler: universellt chassi samt utrustning för frammatning av lastpallar på två nivåer. Arbetsnamnet för denna utrustning är palltruck. Till detta kommer också utrustning för nivellering samt navigerings- och positioneringsutrustning.

Omlastningsbord består av två moduler för frammatning av lastpallar och pellettankar på två nivåer som monteras på ett fast stativ. Omlastningsbordet har även utrustning för nivåinställning.



Figur 15-7. Installation av återfyllningsblock med robot i Bentonitlaboratoriet. Bilden till vänster visar hur roboten hämtar ett block från lastpallen och bilden till höger visar inplaceringen av blocken.

15.2.5 System för navigering, maskinkontroll och produktionskontroll

Komplicerade maskiner som deponeringsmaskinen samt buffert- och återfyllningsutrustning kräver att det finns komplexa datorsystem installerade för att de ska kunna utföra de uppgifter de är ämnade för på ett säkert och kontrollerat sätt. Leverantörerna av standardmaskiner saknar i dag hela eller delar av dessa system. Eftersom det med stor sannolikhet inte finns en leverantör som kan tillverka alla typer av SKB-specifika system är det SKB:s strategi att i egen regi driva utvecklingsprojekt kring de system som identifierats vara gemensamma för dessa maskiner och tekniska system. System som är aktuella för teknikutveckling i egen regi är:

- Navigeringssystem.
- Maskinkontrollsystem (Mission Control System).
- Produktionskontrollsystem (Production Control System).

Nuläge

Navigeringssystem

Det finns i dagsläget flera leverantörer av system för helautomatiserade fordon som arbetar under jord. Ingen av dessa har ett lämpligt chassi eller tillräckligt anpassat dator-/sensorsystem för att kunna utföra mer komplicerade uppgifter såsom återfyllning eller deponering av kapslar. SKB har under flera år arbetat med utveckling av navigationssystemet som förväntas finnas i Kärnbränsleförvaret.

Till deponeringsmaskinen har SKB tillsammans med ett externt företag vidareutvecklat ett navigeringssystem av den typen som återfinns i gruvfordon på marknaden. Navigeringssystemet implementerades runt 2009 och omfattande tester som visar att önskad funktion och tillgänglighet kan uppnås har genomförts i Äspölaboratoriet.

Maskinkontrollsystem

Från 2009 fram till 2012 har deponeringsmaskinen testats från att köras helt manuellt med förare till att användas i ett helautomatiserat läge. Vid de helautomatiserade testerna användes ett verktyg som har en begränsning i att man enbart kan kontrollera ett fordon i taget. I de kommersiella systemen används ofta system som kontrollerar, inte bara en, utan flera maskiner samtidigt inom samma arbetsområde, varför detta kommer att användas i framtiden.

Ett flertal leverantörer finns i nuläget till dessa system/verktyg, men hos ingen ingår möjligheten att styra de planerade SKB-specifika systemen. Kring denna problematik har SKB bedrivit teknikutveckling sedan 2011. Ett system med egenskapen att kontrollera flera SKB-specifika maskiner och där erfarenheter från verktyget för kontroll av ett fordon och olika maskinkontrollsystem är under uppförande.

Maskinkontrollsystemet innehåller logik som hanterar funktioner som:

- Val av transportuppdrag från uppdragslistan och uppdelning av uppdrag till körorder.
- Val av lämplig tillgänglig maskin.
- Val av kortaste rutt för respektive körorder med beaktande av de till buds stående automationsområdena och eventuella blockerade zoner.
- Reservation av segment av rutt för vald maskin enligt tillgänglighet. Kritiska ruttavsnitt och transportuppdragets prioritet.
- Körordergivning till maskiner.
- Körorderuppföljning och frigivning av passerade ruttsegment.
- Körorderförlängning, vilket innebär givande av ny körorder då maskinen ännu utför pågående körorder. Detta krävs för att uppnå smidig körning.
- Rapportering till produktionskontrollsystemet.

Maskinkontrollsystemet är en central del i den logiska separationen av de olika verksamheterna i Kärnbränsleförvaret, för att möjliggöra en säker och effektiv anläggnings- och driftverksamhet i den valda layouten av central- respektive förvarsområdet.

Program

Navigeringsystem

Den teknikutveckling som återstår för navigeringssystemet är att vidareutveckla mjukvaruplattformen för datahantering och styrning.

Maskinkontrollsystem

Tester med systemet för maskinkontroll är planerade att starta 2013 och pågå under 2014.

15.2.6 Produktionskontrollsystem

Produktionskontrollsystemet är ett verktyg som används för att planera, schemalägga och övervaka den dagliga produktionen. I dagsläget finns det ingen möjlighet att skapa en miljö där man kan utveckla alla moduler i systemet. Detta beror på att delar av aktiviteterna som ska utföras i Kärnbränsleförvaret inte finns på plats i Äspölaboratoriet. För att kunna genomföra ett samordningstest, där flertalet av momenten ska utvärderas, är ambitionen att utveckla denna miljö före driftstart av Kärnbränsleförvaret.

15.2.7 Produktionsbyggnaden för buffert- och återfyllningsmaterial

Den utrustning som behövs i produktionsbyggnaden utgörs nästan uteslutande av standardmaskiner. Konceptfasen, enligt teknikutvecklingsmodellen, behöver genomföras för att ta fram underlag till kravspecifikationer och val av utrustning. Detta görs inom ramen för buffert- och återfyllningslinjerna.

16 Horisontell deponering – KBS-3H

KBS-3-metoden gör det möjligt att deponera kapslarna vertikalt (KBS-3V) eller horisontellt (KBS-3H). Vertikal deponering utgör referensutförning, men SKB utreder i samverkan med Posiva horisontell deponering för att se om det kan utgöra ett alternativ till vertikal deponering. En utvärdering av KBS-3H kommer att genomföras efter 2016 och baserat på detta kommer beslut att fattas om SKB ska gå vidare med KBS-3H.

16.1 Utformning av ett KBS-3H-förvar

KBS-3H innebär att långa horisontella deponeringshål borras direkt från Kärnbränsleförvarets stamtunnlar, se figur 16-1. I dessa deponeras en rad så kallade supercontainrar. En supercontainer består av en kapsel omgiven av bentonitbuffert och sammanhållen av en perforerad ytterbehållare av metall. Mellan supercontainrarna placeras distansblock av bentonitlera, dels för förhindra vattenflöde längs deponeringshålet (hydraulisk separation av supercontainrarna), dels för att temperaturen i bufferten inte ska bli för hög (termisk separation av supercontainrarna). Deponeringshålen är upp till 300 meter långa och delas upp i två sektioner med sektionssluggar. I deponeringshålets mynning installeras en förslutningsplugg. Både sektionssluggen och förslutningspluggen har genomföringar som möjliggör artificiell bevättning och avluftning av deponeringshålet och dess komponenter. Den artificiella bevätningen gör att bentoniten sväller ut mot bergväggen även under torra förhållanden i berget.

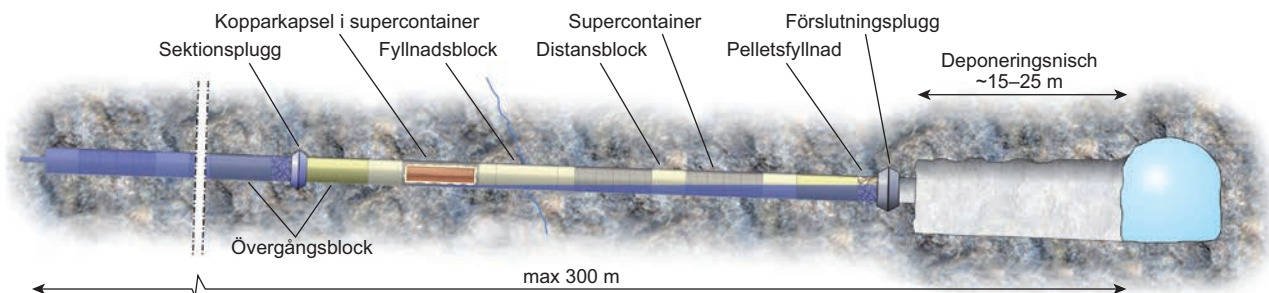
Den bergvolym som behöver tas ut för ett KBS-3H-förvar är mindre än vid vertikal deponering vilket även innebär att mindre volymer behöver återfyllas. Anläggningarna på driftområdet ovan mark och centralområdet samt tillfarter under mark påverkas marginellt om horisontell deponering skulle utföras i stället för vertikal deponering.

16.2 Nuläge och program

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 redovisade SKB vilka utvecklingsfrågor som är viktiga för att KBS-3H ska kunna nå en likvärdig teknisk nivå som KBS-3V. Bland annat nämndes arbetet med att uppdatera och fastställa de geometriska kriterierna för deponeringshålet, val av borrhälssteknik och att finna en lämplig utrustning för att mäta och verifiera att borrhålen uppfyller kraven.

I sitt yttrande över Fud-program 2010 framhöll SSM att en övergång till KBS-3H kräver att det vid prövningstillfället finns en tillräckligt utförlig redovisning för den alternativa utformningen. Detta gäller till exempel analys av den långsiktiga säkerheten. Man tog vid aktuell tidpunkt inte ställning till SKB:s planer avseende utvecklingen av KBS-3H.



Figur 16-1. Principen för utformningen av ett KBS-3H-förvar. Deponeringshålet delas upp i två delar med en sektionsslugg och delarna vattenfylls artificiellt efter att komponenterna installerats. Aktuell figur visar fyllnadsförloppet för den yttre sektionen.

Nuläge

Sedan Fud-program 2010 har SKB i samverkan med Posiva slutfört projektfas KBS-3H Complementary studies. Projektfasen fokuserade på buffertens funktion och interaktioner mellan metall och bentonit. Titan har valts som referensmaterial för pluggar, supercontainerns skal och övriga mindre stödkomponenter. Genom att välja titan i stället för stål undviks till stor del problematiken med interaktioner mellan metall och bentonit och även vätgasbildning. Koppar, vilket kapseln är tillverkad av, var även ett tänkbart alternativ för supercontainerns skal men titan har bättre mekaniska egenskaper för denna tillämpning. Kraven på deponeringshålen är fastställda (SKB 2012) och ett testprogram är initierat på Äspölaboratoriet för att välja borrhäls teknik och mätmetod för verifiering av borrhålen, se avsnitt 16.3.

Efter den slutförda projektfasen är bedömningen att ett koncept baserat på Dawe-designen (Drainage, Artificial Watering and air Evacuation) med användande av titan har goda möjligheter att uppfylla de krav som gäller med avseende på långsiktig säkerhet. Den framtagna utformningen bedöms också vara genomförbar med avseende på konstruktion, tillverkning och installation.

Baserat på dessa resultat beslutade SKB och Posiva 2011 att initiera nästa etapp. Målet för denna etapp är att ta fram underlag och höja design- och systemförståelsen för KBS-3H till en nivå som möjliggör att en PSAR tas fram. I förlängningen blir det då möjligt att göra en jämförelse mellan KBS-3V och KBS-3H.

Program

Huvudaktiviteter under den närmaste treårsperioden är att:

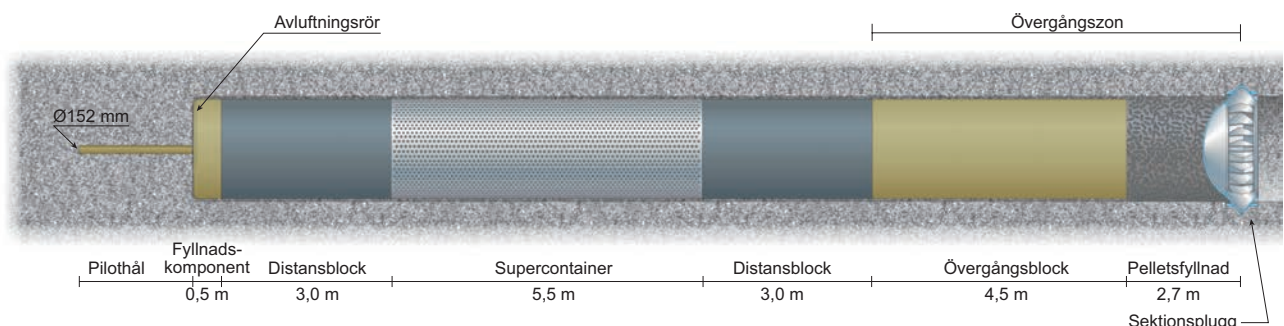
- Utvärdera kemisk erosion och jordbävningsinducerad skjuvning längs sprickor för KBS-3H.
- Ta fram produktionslinjerapporter, specifika för KBS-3H, och uppdatera övrig utformningsspecifik dokumentation.
- Genom demonstration verifiera systemkomponenter i full skala.
- Genomföra en bedömning av den långsiktiga säkerheten för ett tänkt KBS-3H-förvar i Forsmark.

Efter den pågående projektfasen kommer KBS-3H att utvärderas och beslut fattas om eventuell fortsatt utveckling och implementering. SKB gör bedömningen att om KBS-3H skulle bli aktuellt så kommer SKB att ansöka om detta vilket skulle medföra konsekvenser för tidsplaner och tillståndsprövning.

16.3 Demonstration i Äspölaboratoriet

Nuläge

En fullskaledemonstration av KBS-3H:s teknik, Multi Purpose Test (MPT), se figur 16-2, genomförs för att verifiera Dawe-designens implementering och komponenternas funktion då de interagerar med varandra (delsystemtest). Testet innefattar bland annat tillverkning av fullskalekomponenter, montage och deponering av en supercontainer och distansblock samt installation av en sektionsplugg med tillhörande fyllnadskomponenter. Deponeringshålet och komponenterna instrumenteras så att det initiala förloppet kan monitoreras. Efter monitorering bryts testet så att provtagning och analys av bentoniten kan genomföras.



Figur 16-2. Schematisk figur över Multi Purpose Test, MPT, och dess komponenter.

Tidigare studier avseende borrning av deponeringshål indikerar att styrd kärnbörning har störst möjlighet att lyckas. Rakheten hos kärnborrhålet måste dock verifieras med en utrustning för krökmätning, se programmet för geologi, geofysik och geodesi i avsnitt 14.4.2 Modellering och undersökningar. Det behöver därför säkerställas att krökmätningens utrustningen klarar av att mäta med den precision som krävs.

För att få mer slutförvarsliknande förhållanden vid testerna har en ny nisch för KBS-3H sprängts ut i samband med Äspölaboratoriets utbyggnad vid cirka 400 meters djup.

Program

Pågående arbeten med Multi Purpose Test kommer att fortsätta med målet att demonstrera:

- Fullskalig tillverkning, hantering och transport av en supercontainer med bentonitbuffert.
- Tekniken för deponering av supercontainer och buffertkomponenter av bentonit.
- Dawe-designen med fullskalig artificiell bevätning av bufferten i supercontainern och distansblock.
- Sektionspluggens funktion vid artificiell bevätning.
- En metodik att installera sensorer och kablage i KBS-3H-komponenter inför möjliga framtida systemtest.

Pågående arbeten med att utvärdera borrhäls teknik och krökmätningens utrustningar samt etablering av en ny testplats vid Äspölaboratoriet kommer att fortsätta.

16.4 Långsiktig säkerhet

Nuläge

En preliminär bedömning av den långsiktiga säkerheten har sedan tidigare utförts för ett KBS-3H-förvar med data från Olkiluoto. Arbetet har redovisats i rapporten (Smith et al. 2008). Slutsatsen från säkerhetsbedömningen är att KBS-3H, med avseende på den långsiktiga säkerheten och för de förhållanden som råder vid Olkiluoto, är en potentiell utformning för ett förvar på den platsen.

Program

Sedan Fud-program 2010 har SR-Site slutförts för KBS-3V. Erfarenheter från detta arbete pekar på att jordbävningens inducerad skjuvning längs sprickor och kemisk erosion är väsentliga frågor att utvärdera för ett KBS-3H-förvar. Detta eftersom dessa skulle kunna skilja sig från resultaten för KBS-3V. SKB och Posiva planerar därför att genom enklare beräkningar utvärdera effekterna av kemisk erosion och jordbävningens inducerad skjuvning för KBS-3H tidigt i aktuell projektfas.

Under förutsättning att omnämnda studier ger positiva resultat kommer SKB och Posiva att arbeta vidare med konstruktionsförutsättningarna för KBS-3H. Dessa utgör grunden för att färdigställa produktionslinjerapporterna som är viktiga underlag för fortsatt utvärdering av den långsiktiga säkerheten.

Utvärderingen kommer att genomföras stegvis och börjar med en systemutvärdering av den långsiktiga säkerheten för ett deponeringshål installerat enligt Dawe-designen. Efter detta är planen att genomföra en platspecifik bedömning av den långsiktiga säkerheten för ett KBS-3H-förvar i Forsmark. Analysen kommer att bygga på resultaten från SR-Site, med kompletterande analyser av de delar som är specifika för KBS-3H. Syftet är att på sikt kunna jämföra säkerheten för de två förvarsutformningarna och att i ett senare skede kunna göra ett väl underbyggt val mellan KBS-3V och KBS-3H.

Del IV

Forskning för analys av långsiktig säkerhet

- 17 Översikt – forskning för analys av långsiktig säkerhet
- 18 Säkerhetsanalys
- 19 Klimatutveckling
- 20 Kortlivat låg- och medelaktivt avfall
- 21 Långlivat låg- och medelaktivt avfall
- 22 Betongbarriärer
- 23 Bränsle
- 24 Kapsel
- 25 Buffert och återfyllning
- 26 Geosfär
- 27 Ytnära ekosystem
- 28 Andra metoder

17 Översikt – forskning för analys av långsiktig säkerhet

SKB:s naturvetenskapliga forskningsprogram drivs utifrån behovet av att analysera säkerheten vid slutförvaring av radioaktivt avfall och använt kärnbränsle. Det innebär att forskningsprogrammet är utformat för att täcka behoven för såväl Kärnbränsleförvaret som SFR, och på sikt även för SFL.

Syftet med forskningen är att:

1. hitta lösningar till identifierade problem som påverkar säkerheten vid slutförvaren eller som minskar osäkerheten vid analys av förvarens långsiktiga säkerhet,
2. följa den vetenskapliga utvecklingen, dels för att identifiera konsekvenser av nya rön för SKB:s verksamhet, dels för att effektivt ta till vara kunskap som framkommer hos andra organisationer,
3. upprätthålla och utveckla kompetensen för att genomföra analys av långsiktig säkerhet och för att informera myndigheter, granskare och allmänhet på ett vetenskapligt sätt.

Forskningen innefattar både övergripande frågor, som är gemensamma för flera förvarssystem, och frågor som relaterar till ett specifikt förvarssystem. Den forskning som bedrivs med syfte att öka kunskapen om den långsiktiga säkerheten för slutförvaret för använt kärnbränsle har under de senaste åren främst skett inom ramen för säkerhetsanalysen SR-Site (SKB 2011e). Fokus för denna forskning ligger på processer som påverkar de tekniska och naturliga barriärerna i förvarskonceptet eller påverkar konsekvenserna av ett eventuellt utsläpp av radionuklider. Tabell 17-1 ger en översikt över processerna samt storleken på den insats som planeras över kommande treårsperiod, se avsnitt 17.2. Det detaljerade forskningsprogrammet för respektive ämnesområde redogörs för i kapitlen 18–27.

Forskningsfrågor som är specifikt relaterade till det låg- och medelaktiva avfallet som slutförvaras i SFR behandlas i kapitel 20, medan forskningsfrågor relaterade till avfallet i det framtida SFL behandlas i kapitel 21. Frågor som rör betongbarriärer är gemensamma för SFR och SFL, och behandlas i kapitel 22. De processer som studeras för säkerhetsanalysen för utbyggnaden av SFR sammanställs i tabell 17-2, se avsnitt 17.2.

Här nedan ges en sammanfattande beskrivning av de olika forskningsområdena och insatserna under den kommande Fud-perioden. Dessutom ges en sammanställning av kopplingen mellan forskningsprogrammet och de olika projekt som bedrivs vid Äspölaboratoriet, samt en översikt av forskningsverksamheten vid Nova Forskning och Utveckling i Oskarshamn (Nova FoU) och inom ramen för det sameuropeiska Implementing Geological Disposal Technology Platform.

17.1 Sammanfattning forskningsområden

Slutförvaren har syftet att skydda människor och miljö från joniserande strålning. Slutförvaret för använt kärnbränsle innesluter avfallet tills radioaktiviteten avklingat till en ofarlig nivå, medan SFR och SFL släpper ut radioaktivitet i en omfattning som inte skadar människor eller miljö. Förvarens skyddsbarriärer samverkar till att uppnå det övergripande syftet. Förhållandena på markytan påverkar också vilken effekt radioaktiva ämnen skulle ha på människor och miljö då ämnena kommer upp till markytan.

Den vetenskapliga förståelsen av frågor som är relevanta för den långsiktiga säkerheten är väl utvecklad, detta till följd av decenniernas forskning inom svenska och andra nationella program och internationella samarbetsprojekt. Forskningsinsatserna för att förstå Kärnbränsleförvarets utveckling och säkerhet efter förslutning har lett till förståelse av centrala processer som kopparkorrosion, skjuvning av kapslar och andra potentiella orsaker till kapselbrott, samt processer relaterade till fördröjning av radioaktiva ämnen. I SR-Site kunde SKB visa att det går att bygga ett slutförvar för använt kärnbränsle som uppfyller SSM:s krav på långsiktig säkerhet.

Forskningen om processer av betydelse för säkerheten fortsätter, även om den rådande synen är att befintlig kunskap räcker för att styrka långsiktig säkerhet. Behovet av fortsatt forskning gäller särskilt faktorer som enligt SR-Site bidrar till risk och där förutsättningarna för analysen kan förbättras genom ytterligare forskningsinsatser. Forskningsinsatser identifieras oftast i säkerhetsanalysarbetet. Det är därför troligt att behov av nya insatser kommer att identifieras i kommande säkerhetsanalyser. Fortsatt forskning om processer av betydelse för långsiktig säkerhet motiveras också av att det är nödvändigt för att upprätthålla kunskapsläget och för kompetensutveckling.

Vad gäller det kortlivade låg- och medelaktiva avfallet är SKB mitt inne i en utvärderingsfas för SFR. Den fortsatta forskningen för detta avfall kommer till stor del att styras av resultaten från SR-PSU. För det långlivade låg- och medelaktiva avfallet befinner sig arbetet på konceptstadiet. Insatser som specifikt berör det långlivade avfallet kommer att konkretiseras vartefter, även om en hel del processer sannolikt liknar dem i SFR och därmed kan samstuderas.

Inom etablerade geovetenskapliga ämnesområden bedrivs en stor del av forskningen som doktorandprojekt, främst vid KTH, Chalmers tekniska högskola, Stockholms universitet, Uppsala universitet, Umeå universitet och Sveriges lantbruksuniversitet. Stockholms universitet och Chalmers tekniska högskola har även adjungerade professorer från SKB. Detta ger SKB möjlighet att hålla sig ajour med aktuell forskning, påverka forskningsinriktningen och säkra kompetensen inom viktiga områden.

Säkerhetsanalys

Säkerhetsanalysen är det instrument som används av såväl SKB som SSM för att bedöma om ett förvar för radioaktivt avfall och använt kärnbränsle uppfyller de myndighetskrav på långsiktig säkerhet som ställs på en sådan anläggning. Metodiken för analysarbetet har utvecklats under lång tid, parallellt med KBS-3-systemets utveckling. Under senare år har utvecklingen till största delen genomförts och rapporterats i samband med genomförandet av säkerhetsanalyserna; senast inom SR-Site, det vill säga den analys som ligger till grund för ansökan om att bygga ett slutförvar för använt kärnbränsle i Forsmark.

Behoven under kommande Fud-period gäller kompletterande utveckling av metoder för sensitivitetsanalyser och radionuklidtransport, samt en vidareutveckling av kvalitetssäkringen av SKB:s säkerhetsanalyser. Dessutom finns beredskap att hantera metodikrelaterade synpunkter som eventuellt kan komma inom ramen för SSM:s pågående granskning av SR-Site.

Klimatutveckling

Såväl det använda kärnbränslet som det låg- och medelaktiva avfallet kommer att slutförvaras nere i berggrunden. Berget erbjuder en stabil miljö som gör det möjligt att beskriva utvecklingen också på mycket lång sikt. Samtidigt måste SKB visa att slutförvaren klarar myndigheternas säkerhetskrav även under de mest extrema situationer som kan inträffa på markytan. För Kärnbränsleförvaret innebär det att SKB måste kunna överblicka hur klimatet påverkar säkerheten under perioder upp till 1 miljon år.

I SKB:s forskning ligger klimatforskningen som en övergripande verksamhet. Den berör och påverkar flera andra forskningsområden. Klimatrelaterade processer som tillväxten av inlandsisar och permafrost kan påverka havsytans nivå, grundvattenflöde, grundvattenkemi, spänningar i jordskorpan och inte minst livsbetingelserna vid markytan.

Till skillnad från mycket av den övriga klimatforskningen ligger SKB:s fokus inte enbart på global uppvärmning eller på att bestämma exakt när nästa istid inträffar. I stället är det av större vikt att identifiera och beskriva ett flertal tänkbara framtida klimatutvecklingar som tillsammans täcker den osäkerhet som finns kring klimatutvecklingen under dessa mycket långa tidsperspektiv. Dessa klimatfall utgör dels exempel på tänkbara klimatutvecklingar, dels gränssättande extremfall för analysen av olika funktioner hos förvaren. Dessutom är behoven olika för de olika förvaren till följd av att de placeras på olika djup, använder barriärer av olika material och har olika lång analysperiod.

För Kärnbränsleförvarets utveckling studeras främst processer som skulle kunna påverka bufferten och kapseln upp till en miljon år i framtiden. De kommande insatserna handlar till stor del om att öka

kunskapen om inlandsisars variation historiskt sett. Detta för att kunna sätta gränser för hur mäktiga framtida inlandsisar skulle kunna bli.

Andra frågor handlar om vad som händer med förvaret under en istid och hur de hydrogeologiska förhållandena ser ut under en inlandsis. För att förbättra kunskapen om dessa frågor har SKB tillsammans med motsvarande organisationer i Finland och Kanada drivit ett större forskningsprojekt på Grönland, Greenland Analogue Project. Projektet som pågått sedan 2009 och nu är inne i sin slutfas har gett värdefull kunskap som kommit flera av SKB:s forskningsområden till nytta, framför allt hydrogeologi och hydrogeokemi. Detta är information som är användbar även när SKB tittar på hur framtida inlandsisar över ett slutförvar kan komma att bete sig.

För analysen av den långsiktiga säkerheten hos SFR är den förväntade klimatutvecklingen under det närmaste tiotusentalet åren av större vikt. Här handlar det till exempel om att få en uppfattning om när permafrost tidigast skulle kunna bildas och hur djupt den kan gå under den aktuella analysperioden.

Inom klimatprogrammet arbetar SKB även med scenarier som beskriver framtida klimat dominerade av global uppvärmning för att kunna analysera vad dessa klimat skulle betyda för de olika förvarens säkerhet. Arbetet omfattar aspekter av säkerhet på både lång och kort sikt. Det senare fallet inkluderar att ta fram underlag som beskriver tänkbara höjningar av havsytan för dimensionering och konstruktion av förvaren.

Kortlivat låg- och medelaktivt avfall

Det kortlivade låg- och medelaktiva avfallet är mycket varierat och komplext i sin karaktär. Avfallets egenskaper vid förslutning är det som definieras som initialtillståndet och beror på avfallsbehållarna som avfallet är placerat i, hur avfallet har konditionerats samt eventuell kringgjutning av avfallskollina. Även miljön i förvaret under driftperioden kommer att kunna påverka avfallets egenskaper och därmed initialtillståndet. För att uppnå de i säkerhetsanalyserna för SFR ansatta initialtillstånden för avfallet regleras de olika avfallstypernas innehåll av acceptanskriterier och typbeskrivningar.

När förvaret försluts och vattenmätts kommer avfallet att interagera med det inträngande grundvattnet och olika processer tar vid. Dessa kommer att påverka avfallets kemiska och fysikaliska egenskaper och därmed utsläppet av radionuklider. En rapport som behandlar processerna i avfallet i SFR har tagits fram inom SR-PSU och ligger till grund för analysen av den långsiktiga säkerheten. Arbetet har även pågått för att bättre uppskatta det totala material- och radionuklidinventarium vid förslutning av SFR och som nu utöver driftavfall även innefattar avfall från nedmontering och rivning. Den fortsatta forskningen kring kortlivat låg- och medelaktivt avfall kommer till stor del att styras av resultaten från den säkerhetsanalys som görs inom SR-PSU.

Långlivat låg- och medelaktivt avfall

Trots att SFL befinner sig i konceptstadiet planeras för ett förvar med fördröjande säkerhetsfunktion i stället för inneslutande säkerhetsfunktion. På så sätt kommer sannolikt många av de komponenter och material som använts i SFR att återfinnas även i SFL. Dessutom kommer grundvattnet att tränga in efter förslutning och interagera med avfallet. Detta resulterar i att de processer som förväntas ske i SFL i stor utsträckning kommer att likna de som sker i SFR och en hel del av forskningen kan därmed samordnas med motsvarande program för det kortlivade avfallet. Några skillnader mellan förvaren är dock placeringsdjupet samt material- och radionuklidinventarium. Specifika forskningsbehov för långlivat låg- och medelaktivt avfall kommer att identifieras i takt med att utformningen av SFL och dess inventarium konkretiseras.

Betongbarriärer

Betongbarriärer förekommer i SFR och kommer sannolikt även att förekomma i SFL. Betongbarriärernas huvudfunktion är att fördröja utsläpp av radionuklider. Detta uppnås dels genom att betongen utgör en sorptionsyta för radionukliderna och dels genom att betongkonstruktionerna minskar vattenflödet genom förvarsutrymmen och därmed avfallet. Dessa funktioner åstadkoms bäst med en sprickfri betongbarriär. Mycket av den forskning som görs för betongbarriärer går därför ut på att utveckla recept och metoder för betonggjutning samt att öka förståelsen kring degradering av betongen.

Bränsle

Så länge kopparkapseln som innesluter bränslet i Kärnbränsleförvaret är intakt kan inga radioaktiva ämnen spridas från förvaret. Om det skulle gå håll på en kapsel är bränslets egenskaper avgörande för om och när det kan komma ut radioaktiva ämnen i berget. En av de centrala egenskaperna i det sammanhanget är att bränslet generellt löser upp sig mycket långsamt i det vatten som finns i förvarsmiljön. Detta kan därmed fördröja eventuell spridning av radioaktiva ämnen. Därför är forskningen kring bränsleupplösning ett av de centrala områdena för SKB:s fortsatta insatser inom bränsleområdet. Här planeras till exempel insatser för att ta fram data angående bränsleupplösning under slutförvarsliknande förhållanden, samt insatser för att belysa mekanismen för de olika processerna som bidrar till bränsleupplösning.

En del av vissa radioaktiva ämnen har under tiden i reaktorn vandrat mot bränslekutsarnas yta. Dessa sitter därmed mera löst bundna till bränslet. Vid ett eventuellt kapselbrott är det dessa ämnen som löser sig snabbare än bränslematrisen och avgör den initiala mängden radionuklider som kan transporteras till markytan. Det finns indikationer på att högutbrända bränslen innehåller större andel snabbt frigjorda radionuklider vilket föranleder fortsatta forskningsinsatser kring egenskaperna hos högutbrända bränslen. Forskning bedrivs även för att undersöka nya typer av bränslen, exempelvis med tillsatts av krom som tas fram för att optimera bränslets funktion i reaktorerna. Undersökningar av dessa nya bränsletyper sker i stor utsträckning som internationellt samarbete.

Kapsel

Kopparkapseln är den isolerande barriären i KBS-3-förvaret. Den ska se till att det inte kommer ut några radionuklider i berget. I referensscenariot i SR-Site håller kapseln under hela analysperioden. Det finns två situationer som skulle kunna orsaka skador på en kapsel – mekaniska belastningar och kopparkorrosion. Centrala frågor inom det förstnämnda området handlar därför om hur stora isostatiska laster kapseln tål och hur stora skjuvrörelser i berget som kapseln kan stå emot. Detta beskrivs även i kap 12 Teknikutveckling kapsel. Koppars krypegenskaper är därvidlag ett viktigt forskningsområde.

De största forskningsinsatserna görs inom kopparkorrosion för att se vilka processer som kan påverka kapseln. Det finns till exempel fenomen där kunskapen om de bakomliggande processerna behöver förbättras. Det gäller särskilt det faktum att det finns experiment utförda med koppar i syrgasfritt vatten och som genererar vätgas i mängder långt större än vad termodynamiska data förutsäger.

Samtidigt fortsätter arbetet med att minska osäkerheterna vad gäller de processer som faktiskt kan påverka kapselns hållbarhet på lång sikt. Ett exempel är sulfidkorrosion som i SR-Site var den korrosionsprocess som gav störst riskbidrag och därmed också finns med som en fråga i den fortsatta forskningen. Spänningskorrosion är en komplicerad process som också kräver fortsatta insatser.

Buffert och återfyllning

I Kärnbränsleförvaret omges kapseln av en skyddande buffert av bentonitlera. Lerans huvuduppgift är att begränsa grundvattenflödet in till kapseln. Om en kapsel skulle bli otät kommer bufferten även att fördröja transporten av radioaktiva pariklar ut i berget.

Så länge bufferten är intakt finns inga processer som kan göra kapseln otät. I samband med säkerhetsanalysarbetet har det framkommit att bufferten under vissa förhållanden skulle kunna lösas upp och föras ut sprickor i berget, så kallad bufferterosion. Detta skulle kunna hända i samband med att stora mängder smältvatten med låg kalciumhalt från en inlandsis når ner till förvaret. De största forskningsinsatserna handlar därför om att klargöra under vilka förhållande leran inte är stabil, något som genomförs i ett omfattande experimentprogram, såväl i egna projekt som i större samarbetsprojekt inom EU.

Insatser görs också för att utveckla ett program för lerkaraktisering. Här har framsteg gjorts tack vare försöken med alternativa buffertmaterial som pågår i Äspölaboratoriet. Framstegen har gjorts vad gäller förståelsen för mekanismerna bakom förändringar i leran, så kallad homogenisering. Nya modeller har tagits fram för att bättre beskriva denna process i leran och utvecklingen inom området fortsätter.

Bentonitlera kommer även att användas för att återfylla deponeringstunnlarna i Kärnbränsleförvaret. Den forskning som bedrivs kring bufferten täcker även behoven som uppkommer vid utvecklingsarbetet för återfyllningen.

Lerans egenskaper att begränsa vattenflöde och fördröja transporten av radioaktiva ämnen nyttjas även vid slutförvaring av låg- och medelaktivt avfall. Forskningen kring buffertfrågor i Kärnbränsleförvaret är till stora delar tillämpbar för förhållandena i SFR. Vissa insatser görs särskilt för att öka kunskapen om hur bentonitlera och betong fungerar tillsammans. Detta kan även bli tillämpbart vid slutförvaring av det långlivade avfallet. Programmet för detta avfall befinner sig fortfarande i ett konceptstadium varför inga konkreta forskningsfrågor ännu formulerats.

Geosfär

Slutförvaringen av radioaktivt material ska ske nere i berggrunden, en stabil miljö där förhållanden förändras ytterst lite jämfört med vad som sker på markytan. Tack vare vetenskapen om att berget varit stabilt under de senaste årmiljonerna kan förutsägelser göras om förhållanden i berget under lång tid framöver. Forskningen kring geosfären omfattar fyra ämnesområden: geologi, hydrogeologi, hydrogeokemi och bergets transportegenskaper.

Inom dessa områden syftar kommande insatser till att öka kunskapsbasen om de berggrunds-förhållanden som har stor betydelse för utfallet i säkerhetsanalyserna. SR-Site visar tydligt vilka egenskaper och processer som har störst betydelse för Kärnbränsleförvaret. Det handlar om att öka kunskapen om hur egenskaperna varierar i bergvolymen och som funktion av bergarter. SKB måste även förbättra de modellverktyg som används för att beskriva och prediktera de processer som äger rum i berget över mycket lång tid.

Kommande försvarsutbyggnad kommer att ge mer data om berget och dess variationer. Därmed kommer bilden av bergegenskapernas rumsliga variation att detaljeras i framtiden. Fram till dess utvecklas undersöknings- och provtagningsmetoder i Äspölaboratoriet, huvudsakligen inom detaljundersökningsprojektet.

Inom ämnesområdet geologi fokuseras kommande insatser på att öka kunskapen om spjälkning förorsakad av spänningar i berget och av höjd temperatur, metodik för identifiering av stora sprickor, fortsatta studier av glacialt inducerade förkastningar, samt seismiska mätningar som stöd för jordskalvsmodellering och allmän kunskapsuppbyggnad om seismicitet i svensk berggrund. Diskreta spricknätverksmodeller, vilka utgör en bas för analys av bergrörelser såväl som för analys av grundvattenflöde och ämnestransport i sprickor, är ett stort insatsområde med bäring på både hydrogeologi, geologi och bergmekanik.

Insamling av data som rör det ytliga systemets hydrogeologi sker främst inom ramen för de undersökningar som görs på Grönland. Målet är att kunna beskriva hur flödet förändras och varierar under en period som domineras av permafrost. Resultaten används bland annat i säkerhetsanalysen för utbyggnaden av SFR. Hydrogeologiska insatser på djupa grundvattensystem handlar om att integrera data och modeller med andra ämnesområden (geokemi, bergmekanik och transport) samt att underhålla och förbättra de koder som används för flödes- och transportberäkningar. Flödesförhållanden under en glaciation med omfattande permafrost har konsekvenser för situationen på försvarsdjup. Undersökningsdata från projektet på Grönland används både för att förstå flödesprocesserna och optimera modellverktygen.

Geokemiområdet har fortsatt fokus på reaktioner mellan vatten och berg, samt effekter av vattnets rörelse i spricksystemet. Insatser riktas på att i modellerna integrera de geokemiska förhållandena med hydrogeologiska förhållanden och bergets transportegenskaper. Dessutom är mikrobiella processer ett allt viktigare delområde. Här studeras bland annat acetogens eventuella betydelse, samspillet mellan mikrober och virus i berget, biofilmer på sprickytor samt mikrobiella processer i närvaro av vätgas, metan och sulfid.

Programmet för hur lösta ämnen transporteras i grundvatten omfattar studier av flödesrelaterat transportmotstånd, kanalbildning (bredd och frekvens) och diffusion in i stagnanta zoner. Planeringen omfattar även en förbättring av K_d -konceptet (koncept för grundämnesspecifika fördelningskoefficienter), där hänsyn tas till de hydrogeokemiska förhållandena i sprickor.

Syftet är att kunna använda de nyvunna kunskaperna i kommande säkerhetsanalyser. Internationellt forskningsarbete görs inom SKB Task Force for Groundwater Flow and Transport of Solutes. Modelleringsuppgifter utförs av flera grupper från olika organisationer med underlag från experiment och undersökningar vid Äspölaboratoriet eller andra berglaboratorier.

Ytnära ekosystem

Forskning och utveckling inom området ytnära ekosystem syftar främst till att öka förståelsen för de processer som påverkar transport och ackumulation av radionuklider i ytsystemen, samt till utveckling av metodiken för att beräkna och bedöma den radiologiska risken för människors hälsa och för miljön. Stor vikt kommer att läggas på frågeställningar och osäkerheter som har identifierats i arbetet med säkerhetsanalyserna för Kärnbränsleförvaret och utbyggnaden av SFR samt i samband med granskningen av tillståndsansökan för Kärnbränsleförvaret. Även frågeställningar som identifieras vid förberedelser för analys av det kommande förvaret för långlivat radioaktivt avfall, SFL, finns med i det fortsatta arbetet.

Hittills genomförda studier visar att om radionuklider från ett förvar skulle komma ut i berget och transporteras upp till markytan, kommer dessa så småningom att hamna i lågpunkter i landskapet. Om detta sker till terrestra miljöer kommer recipienten med stor sannolikhet att vara en våtmark eller jordbruksmark. Ett område för kommande forskningsinsatser inom ytnära ekosystem är därför studier som syftar till att öka förståelsen för processer som styr transport och ackumulation av radionuklider i våtmarker och jordbruksmarker. Viktigt är också att öka förståelsen för processer som styr transporten av radionuklider från terrestra områden till sjöar och vattendrag. Exempel på processer där studier planeras är retention och biologiskt upptag. Inom programmet för biogeokemi i ytsystemet kommer fortsatt bearbetning av insamlade data att genomföras, för att därigenom öka förståelsen för och förbättra beskrivningen av retention och biologiskt upptag på olika rumsliga skalor.

Kustområdet i Forsmark förändras över tid som en funktion av klimatvariation och strandlinjeförskjutning, vilket har konsekvenser för eventuell exponering av människa och miljö. För att kunna bedöma konsekvenserna om radionuklider skulle komma ut från ett förvar krävs kunskap både om landskapsutvecklingen och om hur processer förändras med ett förändrat klimat. Inom programmet för ytnära ekosystem planeras därför aktiviteter för att vidareutveckla beskrivningen av landskapet och dess utveckling. För att öka förståelsen för hur processer kommer att förändras när klimatet i Forsmark blir kallare kommer SKB att fortsätta det pågående arbetet med att beskriva periglaciala miljöer på Grönland.

När det gäller vidareutveckling av beräkningsmetodik planeras insatser för att ersätta eller komplettera användandet av osäkra koncentrationsfaktorer med mekanistiska modeller för retention och biologiskt upptag för att minska osäkerheterna. SKB kommer även att fortsätta utvecklingen av metodiken för dosberäkningar med utgångspunkt från nyvunnen kunskap från biosfärsprogrammet och från tillämpningar av metodiken på genomförda och pågående säkerhetsanalyser.

SKB bevakar forskningen och internationella råd med att aktivt delta i ett antal internationella samarbetsföretag som rör radiologisk säkerhet för människa och miljö, bland annat inom ramen för IAEA-program och EU-projekt, samt inom sammanslutningar som Bioprotect och International Union of Radioecology (IUR).

17.2 Forskning kopplad till förvarssystem

Den forskning som specifikt relaterar till slutförvaret för använt kärnbränsle och säkerhetsanalysen SR-Site sker inom forskningsområdena bränsle (kapitel 23), kapsel (kapitel 24), samt buffert och återfyllning (kapitel 25). Forskning relevant för SFR och säkerhetsanalysen SR-PSU sker inom områdena kortlivat låg- och medelaktivt avfall (kapitel 20) och betongbarriärer (kapitel 22). Forskning för långlivat låg- och medelaktivt avfall (SFL) beskrivs i kapitel 21.

Kärnbränsleförvaret

Säkerhetsanalysen SR-Site (SKB 2011e) beskriver Kärnbränsleförvarets långsiktiga säkerhet och gränssätter betydelsen av identifierade osäkerheter. Forskningsprogrammet fortsätter för att SKB ska få ytterligare kunskap och kunna minska de osäkerheter som finns kvar. Därigenom bör mer realistiska bedömningar av Kärnbränsleförvarets säkerhetsmarginal kunna göras i framtida säkerhetsanalyser. De största osäkerheterna (kunskapsluckorna) gäller korrosion av kopparkapseln och bentonitlerans funktion på lång sikt. Under utbyggnaden av förvarsanläggningen kommer kunskapen om berget att öka. Detta sker genom observationer och mätningar som ger en mer detaljerad bild av variationen hos olika egenskaper i berget som till exempel vattengenomsläpplighet, bergspänningar och grundvattensammansättning.

Det använda bränslets egenskaper samt de processer som sker om bränslet kommer i kontakt med vatten, utgör en väsentlig del av forskningen för att definiera källtermen för nuklidtransportberäkningar. Vissa av dessa processer är bundna till initialtillståndet, till exempel typ av bränsle och utbränningsgrad. Information om detta återfinns i kapitel 11 Teknikutveckling bränslehantering, och i kapitel 23 Bränsle.

Kapselns förmåga att innesluta bränslet är väsentlig och forskning inom ramen för säkerhetsanalysen är fokuserad kring de processer som kan förväntas ske efter deponering. Viktiga processer är korrosion och mekaniska belastningar. Kunskap om initialtillståndet för kapseln presenteras i kapitel 12 Teknikutveckling kapsel och i kapitel 24 Kapsel.

Alla processer i bufferten efter deponering, till exempel vattenuptag, svällning, frysning och erosion, är viktiga för utfallet av säkerhetsanalysen SR-Site. Många processer i återfyllningen är i det närmaste identiska med dem som sker i bufferten, och forskning kring detta presenteras därför gemensamt med bufferten i kapitel 25 Buffert och återfyllning.

SFR

Kortlivat låg- och medelaktivt avfall placeras i dag i SFR i Forsmark. På SKB pågår arbete med säkerhetsanalysen för en utbyggnad av anläggningen. De processer som sker i denna typ av avfall är specifika för avfallstypen och forskningsprogrammet för frågor som rör långsiktig säkerhet fokuserar på korrosion och degradering av organiska ämnen i avfallet, se kapitel 20.

De tekniska barriärer som används i SFR samt planeras för utbyggnaden, påverkas till stor del av processer som sker i cement och betong vilket avspeglas i forskningsprogrammet som beskrivs i kapitel 22. Forskning kring de processer som sker i de lerbarriärer som används i SFR (silobufferten) presenteras gemensamt med forskning kring buffert och återfyllning i kapitel 25.

SFL

Forsknings- och säkerhetsanalysarbetet för SFL håller på att byggas upp och kommer att kunna vidareutvecklas utifrån den konceptstudie som tas fram där olika strategier för slutligt omhändertagande av långlivat avfall värderas. Studien visar att SFL kommer att bygga på geologisk förvaring varför mycket av den forskning som relaterar till Kärnbränsleförvaret och SFR är relevant även för forskningen som kommer att vara aktuell för en framtida säkerhetsanalys för SFL. Forskningsinsatser för långlivat låg- och medelaktivt avfall presenteras i kapitel 21.

Processer

Forskningsinsatser för de olika processerna som hanteras i analysen av långsiktig säkerhet bedöms på en tregradig skala som stora, måttliga eller små. Dessa processer kan, utifrån nya resultat, komma att omprövas både vad gäller deras betydelse (definition) och den forskningsinsats som krävs framöver (omfattning). Redovisningen i varje Fud-program och synpunkterna från framför allt Strålsäkerhetsmyndigheten påverkar definitionen av processerna.

Graderingen av processerna redovisas i tabell 17-1 jämfört med den i Fud-programmen 2010 och 2007 (det vill säga den tidsperiod som säkerhetsanalysprojekten SR-Site och SR-Can pågått). Som framgår av figuren har bedömningen av insatserna för flertalet processer inte förändrats. Bland de som förändrats har en del klarlagts, medan andra tillkommit.

Tabell 17-1. Processer i bränsle, kapsel, buffert och återfyllning samt geosfären. Färgkodningen i tabellen visar vilka forskningsinsatser som bedöms nödvändiga för den kommande treårsperioden och hur denna bedömning såg ut i Fud-program 2007 och 2010.

Typ av process	Bränsle			Kapsel			Buffert och återfyllning			Geosfär		
	2007	2010	2013	2007	2010	2013	2007	2010	2013	2007	2010	2013
Strålningsrelaterade processer	Radioaktivt sönderfall 23.2.2											
				Stråldämpning/värmealstring 24.2.1			Stråldämpning/värmealstring 25.5.2					
	Inducerad fission – kriticitet 23.2.3											
Termiska processer	Värmetransport 23.2.1			Värmetransport 24.2.1			Värmetransport 25.5.3			Värmetransport 26.3		
							Frysning 25.5.4					
Hydrauliska processer	Vatten- och gastransport i kapselns hålrum, kokning/kondensation 23.2.1						Vattentransport vid omättade förhållanden 25.5.5			Grundvattenströmning 26.4		
							Vattentransport vid mättade förhållanden 25.5.6			Gasströmning/gaslösning 26.5		
							Gastransport/gaslösning 25.5.7					
							Piping/erosion 25.5.8					
Mekaniska processer	Termisk expansion/kapslingsbrott 23.2.1			Deformation av insats 24.2.2			Svällning 25.5.9			Rörelser i intakt berg 26.6		
				Deformation av kopparkapsel vid yttre övertryck 24.2.3						Reaktivering – rörelse längs befintliga sprickor 26.8		
				Deformation från inre korrosionsprodukter 24.2.5						Sprickbildning 26.9		
										Tidsberoende deformationer 26.10		
				Termisk expansion 24.2.4						Termisk rörelse 26.7		
				Strålpåverkan 24.2.6								

Stora insatser

Måttliga insatser


Små insatser/bevakning under kommande treårsperiod


Processen breskrivs inte i detta Fud-program

Typ av process	Bränsle			Kapsel			Buffert och återfyllning			Geosfär		
	2007	2010	2013	2007	2010	2013	2007	2010	2013	2007	2010	2013
Kemiska processer	Advektion och diffusion 23.2.1			Korrosion hos insats 24.2.1			Advektion 25.5.10			Advektion/blandning – grundvattenkemi 26.11		
	Restgasradiolys/syrabildning 23.2.1			Galvanisk korrosion 24.2.1			Diffusion 25.5.11			Diffusion – grundvattenkemi 26.13		
	Vattenradiolys 23.2.4			Spänningskorrosion hos insats 24.2.7			Osmos 25.5.12			Reaktioner med berget – grundvattenkemi 26.15		
	Metallkorrosion 23.2.5						Jonbyte/sorption 25.5.13					
	Bränsleupplösning 23.2.6			Korrosion kopparkapsel 24.2.8			Montmorillonitomvandling 25.5.14			Mikrobiella processer 26.17		
	Lösning av gapinventarium 23.2.1			Spänningskorrosion kopparkapsel 24.2.9			Järn/bentonit 25.5.15			Nedbrytning av oorganiskt konstruktionsmaterial 26.18		
							Koppar/bentonit 25.5.16					
	Speciering av radionuklider, kolloidbildning 23.2.7			Jordströmmar – läckströmskorrosion 24.2.10			Lösning/fällning föroreningar 25.5.17			Kolloidomsättning – kolloider i grundvatten 26.19		
	Heliumproduktion 23.2.8			Utfällning av salt på kapselytan 24.2.11			Cementering 25.5.18			Gasbildning/gaslösning 26.21		
	Omvandling av bränslematriser 23.2.9						Kolloidfrigörelse/erosion 25.5.19			Metanisomsättning 26.22		
Integration /modellering							Strålinducerad montmorillonitomvandling 25.5.20			Saltutfrysning 26.23		
							Radiolys av porvatten 25.5.1					
							Mikrobiella processer 25.5.21					
										DFN 26.24.1		
Radionuklidtransport							THM-utveckling omåttade förhållanden 25.5.5			THM-utveckling 26.24.2		
										Hydrogeokemisk utveckling 26.4.3		
							Advektion 25.5.10			Advektion/blandning 26.11		
							Diffusion 25.5.11			Diffusion 26.14		
							Jonbyte/sorption 25.5.13			Sorption 26.16		
									Kolloidtransport 26.20			
						Radionuklidtransport i bufferten 25.5.22			Radionuklidtransport i geosfär 26.24.4			

 Stora insatser

 Måttliga insatser

 Små insatser/bevakning under kommande treårsperiod

 Processen beskrivs inte i detta Fud-program

Tabell 17-2. Aktiviteter avseende kortlivat låg- och medelaktivt avfall samt barriärer för detta (för insatser inom geosfär se tabell 17-1).

Typ av aktivitet	Avfall	Betongbarriärer
Initialtillstånd	Geometri	Geometri
	Strålningsintensitet	Temperatur
	Temperatur	Hydrovariabler
	Hydrovariabler	Mekaniska spänningar
	Mekaniska spänningar	Materialsammansättning
	Totalt radionuklidinventarium	Vattensammansättning
	Materialsammansättning	Gasvariabler
	Vattensammansättning	
Strålningsrelaterade processer	Radioaktivt sönderfall, 20.2.2	
	Stråldämpning och värmealstring, 20.2.3	
	Strålningsinducerad nedbrytning av organiskt material, 20.2.4	
	Vattenradiolys, 20.2.5	
Termiska processer	Värmetransport, 20.2.6	Värmetransport, 22.2.2
	Fasförändring/frysning 20.2.7	Fasförändring/frysning 22.2.23
Hydrauliska processer	Vattenuptag och transport under omåttade förhållanden, 20.2.8	Vattenuptag och transport under omåttade förhållanden, 22.2.4
	Vattentransport under mättade förhållanden, 20.2.9	Vattentransport under mättade förhållanden, 22.2.5
		Gastransport och vattenlöslighet, 22.2.6
Mekaniska processer		Tryck från svällande avfall, 22.2.7
		Tryck från bentonit, 22.2.8
	Sprickbildning 20.2.10	Sprickbildning, 22.2.9 Bergutfall, 22.2.10
Kemiska processer	Advektiv transport av lösta ämnen, 20.2.11	Advektion och blandning, 22.2.11
	Diffusiv transport av lösta ämnen, 20.2.12	Diffusion, 22.2.12
	Sorption, 20.2.13	
	Kolloidbildning och kolloidtransport, 20.2.14	Kolloidtransport och filtrering, 22.2.14
	Upplösning, utfällning och omkristallisation, 20.2.15	Upplösning, utfällning och omkristallisation, 22.2.15
	Kemisk degradering av organiska ämnen, 20.2.16	Porvattenspeciering och betonginteraktioner, 22.2.16
	Vattenuptag/svällning, 20.2.17	
	Mikrobiella processer, 20.2.18	Mikrobiella processer, 22.2.17
	Metallkorrosion, 20.2.19	Metallkorrosion, 22.2.18
Gasbildning och gastransport, 20.2.20	Gasproduktion, 22.2.19	
Radionuklidtransport	Speciering av radionuklider, 20.2.21	Speciering av radionuklider, avsnitt 22.2.20
	Radionuklidtransport i vattenfas, 20.2.22	Radionuklidtransport i vattenfas, avsnitt 22.2.21
	Radionuklidtransport i gasfas, 20.2.23	Radionuklidtransport i gasfas, avsnitt 22.2.22

Insatsernas omfattning identifieras inom SR-PSU (våren 2014)

Små insatser/bevakning under kommande treårsperiod

17.3 Andra metoder

SKB följer utvecklingen av andra metoder för att ta hand om använt kärnbränsle utöver KBS-3-metoden. Dessa andra metoder är separation och transmutation (avsnitt 28.1) och deponering i djupa borrhål (avsnitt 28.2).

17.4 Forskning i Äspölaboratoriet, Nova FoU och europeiskt samarbete

17.4.1 Forskning vid Äspölaboratoriet

Äspölaboratoriet är en hörnsten i SKB:s program för forskning och teknikutveckling. Syftet med flera av projekten som pågår vid Äspölaboratoriet är att ge ökad kunskap om långsiktig säkerhet. Dessa projekt handlar främst om processer i kapsel, buffert och berggrund. I tabell 17-3 ges ett antal exempel på projekt i Äspölaboratoriet som helt eller delvis är inriktade på långsiktig säkerhet, samt hänvisning till var i detta Fud-program projektet omnämns. De nya projekt som planeras i Äspölaboratoriet är huvudsakligen inriktade på teknikutveckling och den forskning som föranleds därav. Endast ett fåtal rena grundforskningsprojekt är planerade.

Tabell 17-3. Översikt över projekt vid Äspölaboratoriet med koppling till forskning om långsiktig säkerhet. För lokalisering av projekten i Äspölaboratoriet, se figur 1-12.

Projekt	Process	Avsnitt
MiniCan	Deformation inre korrosionsprodukter	24.2.5
	Korrosion kopparkapsel	24.2.8
Lot-försöket	Montmorillonitombildning	25.5.14
	Koppar-bentonitinteraktion	25.5.16
	Korrosion kopparkapsel	24.2.8
Alternativa buffertmaterial	Diffusion	25.5.11
	Jonbyte/sorption	25.5.13
	Montmorillonitombildning	25.5.14
	Järn-bentonitinteraktion	25.5.15
Lasgit	Gastransport/gaslösning	25.5.7
TBT-försöket	Vattentransport omättade förhållanden	25.5.5
	Järn/bentonit	25.5.15
Återtagningsförsöket (CRT)	Vattentransport omättade förhållanden	25.5.5
	Vattentransport mättade förhållanden	25.5.6
	Svällning	25.5.9
Apse (Pelarförsöket)	Termisk rörelse	26.7
Prototypförvaret	Mikrobiella processer	25.5.21
	Vattentransport omättade förhållanden	25.5.5
	Termisk rörelse	26.7
	Värmetransport (geosfären)	26.3
	Sprickbildning	26.9
True	Integrerad modellering – radionuklidtransport	26.24.4
LTDE-SD	Diffusion – radionuklidtransport	26.14
Mikrobprojekten	Mikrobiella processer	26.17
Swiw-tester	Reaktioner med berget – sorption av radionuklider	26.16
	Integrerad modellering – radionuklidtransport	26.24.4

Intresset för att nyttja Äspölaboratoriet är stort, inte bara inom Sverige utan även internationellt. Ett flertal organisationer från olika länder deltar i det internationella samarbetet som bedrivs i Äspölaboratoriet. De utländska organisationerna deltar både i det experimentella arbetet och i modelleringsarbetet inom Task Force-grupperna. Task Force-grupper finns för modellering av transport av ämnen lösta i vatten (Äspö modelling Task Force on Groundwater Flow and Transport of solutes) och för modellering av processer i leran (Äspö modelling Task Force on Engineered Barrier Systems). Arbetet inom respektive grupp genomförs i form av projekt, oftast kopplade till experiment i Äspölaboratoriet. SKB får på så sätt tillgång till resultat från flera olika modelleringsgrupper, vilka i sin tur får tillgång till relevanta data. Task Force-grupperna samlas cirka två gånger per år för att rapportera resultat och diskutera gemensamma angelägenheter.

I Äspö modelling Task Force on Groundwater Flow and Transport of solutes deltar följande organisationer:

Posiva Oy, Finland

BMWi, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Tyskland

Criepi, Central Research Institute of (the) Electric Power Industry, Japan

KAERI, Korea Atomic Energy Research Institute, Sydkorea

JAEA, Japan Atomic Energy Agency, Japan.

Följande organisationer deltar i Äspö modelling Task Force on Engineered Barrier Systems:

Posiva Oy, Finland

BMWi, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Tyskland

Criepi, Central Research Institute of (the) Electric Power Industry, Japan

NWMO, Nuclear Waste Management Organization, Kanada

Rawra, Radioactive Waste Repository Authority, Tjeckien

Nagra, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Schweiz

NDA, Nuclear Decommissioning Authority, Storbritannien.

SKB International hanterar kontrakten med de utländska deltagarna och erbjuder olika grader av engagemang i organisationernas specifika önskemål. Deltagandet i Task Force-arbetet administreras fortsättningsvis av SKB där gemensamma kostnader fördelas mellan deltagarna.

17.4.2 Forskningsbreddning vid Nova FoU

Nova FoU är en plattform för forskning och utveckling inom ramen för Nova Utbildning, FoU och Affärsutveckling. Plattformen, som är ett samarbete mellan SKB och Oskarshamns kommun, utgör ett kompetenscentrum där flera universitet, bland annat Linnéuniversitetet, och andra högskolor och företag, både från Sverige och andra länder, genomför forsknings- och utvecklingsprojekt. För att nå upp till vad som är ambitionen, ett centrum i världsklass, kommer information om de nya forskningsmöjligheterna via Nova FoU kopplat till SKB:s laboratorier att intensifieras nationellt och internationellt. SKB och Oskarshamns kommun styr gemensamt Nova FoU via en styrgrupp med två representanter var från SKB och kommunen samt varsin representant från KTH och Linnéuniversitetet. Forskningsprojekt som accepteras på plattformen är externfinansierade utan koppling till SKB:s verksamhet. Resultat kan trots det vara av betydelse för SKB. SKB och Oskarshamns kommun finansierar gemensamt ledningen för Nova FoU.

Nova FoU har, genom avtal, tillgång till SKB:s laboratorier (Äspölaboratoriet, Bentonitlaboratoriet och Kapsellaboratoriet) liksom SKB:s data och kompetens. Forsknings- och utbildningsprojekten drivs i dessa anläggningar av olika universitet och företag. Projekten har utgångspunkt i de unika möjligheter som SKB:s laboratorieverksamhet, undersökningsdatabaser och kompetensinfrastruktur ger. Forskningen kan vara av varierande karaktär inom flera vetenskapsområden, men fokus ligger på geosfärforskning och utveckling som kopplar till hydrogeokemi, hydrogeologi, geologi och teknik i jord och berg. De huvudsakliga inriktningarna är grundforskning, miljöforskning och instrumentutveckling. En komplett lista över de projekt som bedrivs inom Nova FoU finns på www.novafou.se. Exempel på projekt som olika universitet och högskolor bedriver är:

Linnéuniversitetet: Grundvattnets sammansättning, transport av farliga ämnen, klimatförändringar, hantering av kontaminerade sediment (doktorand- och postdokutbildningar).

Kungliga Tekniska högskolan: Vattenförvaltning, interaktionen mellan land och vatten (doktorandutbildning).

Chalmers tekniska högskola: Grundvattenförändringar vid tunnelbyggnation (doktorandutbildning).

Sveriges lantbruksuniversitet: Restvärme från industrin för växthusodling.

Naturhistoriska riksmuseet i Stockholm: Mikrober som fossil.

Göttingen Universität: Effekter från mikrober i grundvatten (doktorand-, postdokutbildning).

University of Queensland: Tolkning av mätdata i borrhål (doktorandutbildning).

Företag: Teknikutveckling för att övervaka personer och maskiner i tunnelmiljo, korrosion av bergbultar (affärsutveckling).

Masterutbildning i kärnteknik och slutförvar: Bedrivs i samarbete mellan KTH, Linnéuniversitetet, EU samt Nova Utbildning, FoU och Affärsutveckling. Äspölaboratoriet används som klassrum för studier i geologisk slutforvarsteknik.

Nationellt geosfarslaboratorium

Vetenskapsrådet har beviljat Stockholms universitet, som huvudsökande, ett planeringsbidrag för att utreda och planera för hur Äspölaboratoriet och SKB:s databaser kan utnyttjas som en forskningsinfrastruktur tillgänglig för forskning utanför SKB:s intresseområden. Projektet som stöds av ett stort antal större universitet och högskolor i Sverige kallas NGL, Nationellt geosfarslaboratorium. Det kan ses som en utvidgning av verksamheten inom Nova FoU. Planeringen som nu pagar syftar till att ansöka om medel för att bygga upp och driva ett nationellt geosfarslaboratorium under en period på 5–15 ar.

17.4.3 Plattform för europeiskt samarbete

Elva organisationer från elva europeiska länder har skapat en plattform för forstarkt europeiskt samarbete kring slutförvarsfrågor. Plattformen som heter Implementing Geological Disposal Technology Platform, IGD-TP, stöds av EU-kommissionen och syftar till att gemensamt arbeta för att de avfallsprogram som ligger närmast en realisering, får stöd för att lyckas i sina ansträngningar. Detta kommer senare alla övriga tillgodo (IGD-TP 2011, 2012). IGD-TP identifierar och prioriterar forsknings- och teknikutvecklingsinsatser som är nödvändiga och tidsmässigt kritiska för att de första slutförvaren i Europa ska vara i drift till 2025. IGD-TP förfogar inte över några ekonomiska resurser, men har indirekt inflytande på hur EU:s forskningsmedel fördelas inom området.

IGD-TP stödjer ett antal prioriterade arbetsområden, alltifrån stora, gemensamma EU-finansierade teknikutvecklingsprojekt, till exempel Dopas (pluggar i forvarstunnlar), och forskningsprojekt, till exempel Belbar (bentonitstabilitet och buffererosion), till gemensamma arbetsgrupper och expertnätverk. SKB:s motiv för att vara aktiv på plattformen är att detta ger en förankring både vetenskapligt och kommunikativt inom hela Europa.

Följande organisationer deltar i IGD-TP:

Ondraf, The Belgian Agency for Radioactive Waste and Enriched Fissile Materials, Belgien

Rawra, Radioactive Waste Repository Authority, Tjeckien

Andra, Agence Nationale pour la gestion des déchets radioactifs, Frankrike

BMWi, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Tyskland

Puram, Public Agency for Radioactive Waste Management, Ungern

Posiva Oy, Finland

Nagra, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Schweiz

Enresa, Empresa Nacional de Residuos Radiactivos S. A., Spanien

SKB, Svensk Kärnbränslehantering AB, Sverige

Covra, Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval, Nederländerna

NDA, Nuclear Decommissioning Authority, Storbritannien.

18 Säkerhetsanalys

18.1 Inledning

Säkerhetsanalysen är det instrument som används av såväl SKB som SSM för att bedöma om ett förvar för radioaktivt avfall uppfyller de myndighetskrav på långsiktig säkerhet som ställs på en sådan anläggning. I Sverige är det primära kravet formulerat som en riskgräns och en central del av säkerhetsanalysen består i att kvantitativt uppskatta den radiologiska risken förknippad med förvaret i fråga. Säkerhetsanalysen har också en viktig roll i att ge återkoppling till Fud-programmet genom att peka i) på områden där ökad kunskap skulle kunna leda till mer realistiska och därmed ofta mer gynnsamma utfall av analyserna, samt ii) på möjliga förbättringar av utformningen av ett förvar. Säkerhetsanalyser och återkommande säkerhetsredovisningar kommer att behöva genomföras ända fram till förslutningen av de tre slutförvaren.

År 2011 avslutade SKB arbetet med säkerhetsanalysen för ansökningarna om att bygga ett slutförvar för använt kärnbränsle i Forsmark. För närvarande genomförs en säkerhetsanalys som stöd för ansökningarna om en utbyggnad av det befintliga slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall i Forsmark (SFR).

All väsentlig utveckling av metodik för säkerhetsanalyser har skett och sker inom ramen för de två projekt där de nämnda analyserna genomförs. Fullständiga redovisningar av metoder och tillämpningar ges i rapporteringarna från projekten. I denna Fud-rapport ges en redovisning av pågående metodikutveckling för Kärnbränsleförvaret i avsnitt 18.2 och i avsnitt 18.3 redovisas frågor kring metodik för säkerhetsanalysen för SFR.

Internationellt används begreppet ”safety case” vanligen för hela den argumentation kring långsiktig säkerhet som ingår i till exempel en ansökan om att uppföra ett förvar, medan termen ”safety assessment” ofta betecknar de specifika analyser och beräkningar som används för att undersöka uppfyllelse av tillämpliga säkerhetsrelaterade gränsvärden, se till exempel NEA (2004). Innehållet i SKB:s säkerhetsanalyser styrs bland annat av kraven på innehåll enligt SSM:s föreskrifter. Därigenom blir innebörden i termen ”säkerhetsanalys” i SKB:s användning snarlik den i begreppet ”safety case”.

18.2 Metodik för analys av Kärnbränsleförvarets långsiktiga säkerhet

I säkerhetsanalysen SR-Can användes en metodik i tio steg (SKB 2006b). Metodiken granskades av SKI och SSI inom ramen för samrådet med SKB under platsundersökningsskedet. Myndigheterna fann då att metodiken i huvudsak överensstämde med gällande föreskriftskrav, men pekade också på ett antal punkter där den behövde förstärkas. Dessa synpunkter togs om hand i säkerhetsanalysen SR-Site (SKB 2011e) som ligger till grund för SKB:s ansökan om tillstånd att uppföra Kärnbränsleförvaret. SR-Site granskas för närvarande (hösten 2013) av SSM och de synpunkter på säkerhetsanalysmetodik som framkommer inom granskningen kommer att tas om hand vid analysen av säkerheten efter förslutning för den preliminära säkerhetsanalysrapport (PSAR) som erfordras för ansökan om byggstart för Kärnbränsleförvaret. Alternativt kan SSM komma att ställa kompletterande krav på metodiken redan inom den pågående tillståndsprövningen, och i så fall kommer SKB att ta hand om kraven innan arbetet med PSAR påbörjas.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SSM lämnade också synpunkter på SKB:s säkerhetsanalysmetodik i granskningen av Fud-program 2010. Dessa synpunkter överlappade delvis dem i granskningen av SR-Can och har då hanterats inom SR-Site. SSM framförde i granskningen följande synpunkter kring säkerhetsanalys av Kärnbränsleförvaret:

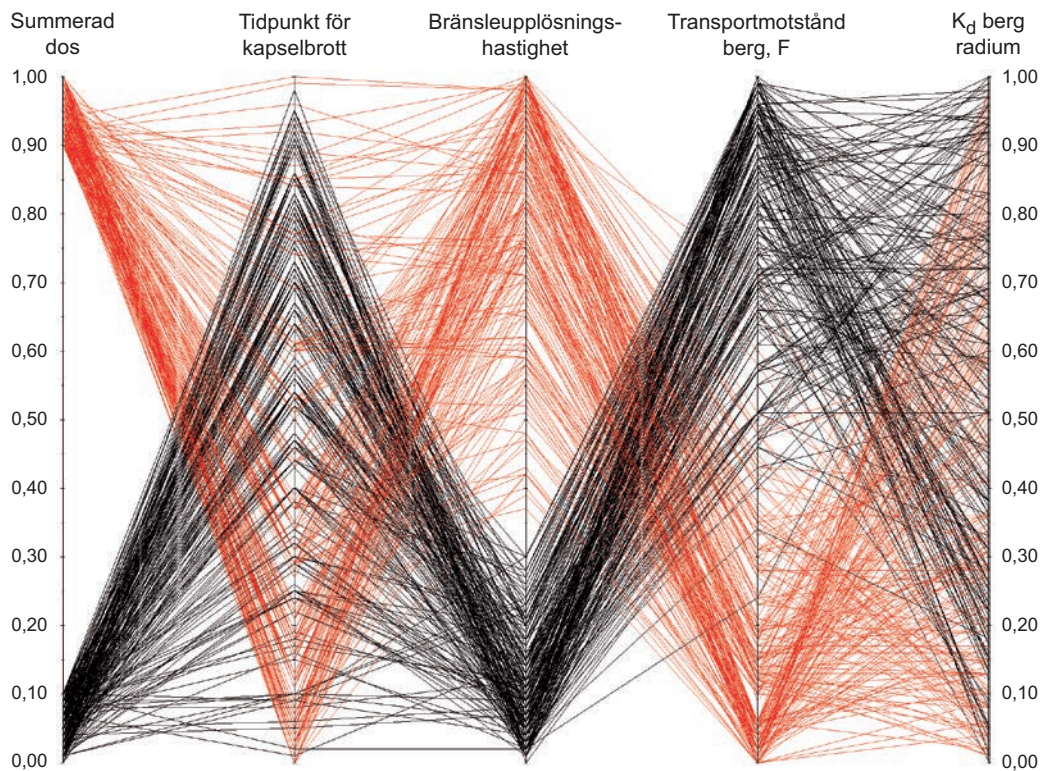
- ”SSM bedömer att SKB med tanke på erfarenheterna från SR-Site bör ligga i framkant inom säkerhetsanalys och bör ha goda möjligheter att bidra till den internationella utvecklingen inom området.”
- ”SKB har dock enligt SSM:s bedömning behov av att modernisera vissa centrala områden inom säkerhetsanalysen som, t.ex. metoder för osäkerhets- och känslighetsanalys och verktyg för beräkningar kopplade till radionuklidtransport.”
- ”Upprätthållande av en långsiktig kapacitet i ett specialiserat och kompetenskrävande område som säkerhetsanalys är förknippat med en rad svårigheter. Ett exempel är beroendet av ett fåtal individer som besitter kunskaper och erfarenheter som är svåra att ersätta. SKB kan därför framöver behöva ägna ökad uppmärksamhet åt utbildningsinsatser samt kunskapshantering inom området långsiktig säkerhet.”
- ”Det föreligger eventuellt ett fortsatt behov av att utveckla metodiken för kvalitetssäkring av säkerhetsanalys med utveckling av styrande dokument och instruktioner, kvalitetsrevisioner, erfarenhetsåterföring etc. Det är en stor utmaning att få det stora antalet personer som behövs för att tillgodose kompetensbehov inom många olika discipliner att arbeta på ett konsekvent och strukturerat sätt. SSM avser att återkomma till frågan i samband med granskningen av SR-Site.”

De utvecklingsinsatser kring säkerhetsanalysmetodik som genomförs eller planeras inom dessa områden redovisas i nedanstående avsnitt.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

Vad gäller metoder för osäkerhets- och känslighetsanalys pågår en utveckling av verktyg för så kallad variansbaserad sensitivitetsanalys. Denna kraftfulla metod för att utröna vilka osäkra indataparametrar som har den största påverkan på osäkerheter i ett probabilistiskt beräkningsresultat, lämpar sig bland annat för problem som kan hanteras med en snabb beräkningsmodell, eftersom metoden kräver att ett stort antal modellrealiseringar genomförs. Eftersom SKB tidigare utvecklat snabba, analytiska beräkningsmodeller för radionuklidtransport (Hedin 2002), finns förutsättningarna att använda variansbaserad sensitivitetsanalys för resultat från dessa modeller. Beräkningsmodellen kan efter ytterligare förenklingar göras så snabb att den variansbaserade sensitivitetsanalysen kan drivas längre än vad som är vanligt inom andra områden. Metodiken för detta har utvecklats och redovisats översiktligt (Hedin 2013a) och en första tillämpning har också redovisats (Hedin 2013b). Utvecklingen fortsätter och metoden bör vid behov kunna tillämpas på beräkningsresultat från såväl numeriska som analytiska modeller för radionuklidtransport i PSAR.

En enkel metod för att grafiskt redovisa känsligheter för osäkra indata har tillämpats på probabilistiska beräkningsresultat hämtade från SR-Site (Hedin 2013b). Metoden benämns cobweb-plot och förklaras enklast med ett exempel. Figur 18-1 visar en cobweb-plot för en beräkning av det summerade radionuklidutsläppet från fjärrområdet omräknat till total dos. På den vänstra vertikala axeln representeras dosresultatet i varje realisering av en punkt, som anger den percentil resultatet svarar mot. I figuren visas bara de realiseringar som ger de 10 procent högsta (röda punkter) och 10 procent lägsta (svarta punkter) dosresultaten. Nästa vertikala axel visar tiden för kapselbrott i varje realisering, också som percentiler. För varje realisering förbinds punkten på dosaxeln med punkten på axeln för kapselbrottstid med ett streck. Mönstret i figuren visar då tydligt att höga doser företrädesvis hör ihop med tidiga kapselbrott och tvärtom. Nästa axel visar på motsvarande sätt bränsleupplösningshastighet och här framgår att höga doser som förväntat hör ihop med höga bränsleupplösningshastigheter och tvärtom. Metoden är enkel att både använda och förstå och kräver ingen metod- eller kodutveckling eftersom programmet som använts är fritt tillgängligt. I den utsträckningen förnyade beräkningar av radionuklidtransporter krävs för PSAR för Kärnbränsleförvaret avser SKB att använda bland annat denna metod för att åskådliggöra de probabilistiska beräkningsresultatens känslighet för osäkerheter i indata.



Figur 18-1. Cobweb-plot för att åskådliggöra känsligheter hos probabilistiskt beräknade utsläpp från fjärrområdet (omräknade till totaldoser) för osäkerheter i indata. Se texten för vidare förklaring.

För Kärnbränsleförvaret bedömer SKB i dag att verktygen för beräkningar kopplade till radionuklidtransport är ändamålsenliga. Sedan granskningen av Fud-program 2010 har radionuklidtransportmodellen Marfa utvecklats ytterligare, se avsnitt 26.12 Advektion/dispersion – radionuklidtransport, och bedöms i dag kunna utgöra ett kvalitetssäkrat verktyg för säkerhetsanalys av Kärnbränsleförvaret.

Program

Inom säkerhetsanalysen för utbyggnaden av SFR prövas nya metoder för att koppla radionuklidtransport i geosfär och biosfär samt dosberäkningar i biosfären, se avsnitt 18.3. Utfallet av detta kommer att beaktas då hanteringen läggs fast för de eventuella uppdateringar av beräkningarna i SR-Site som kan behövas för PSAR för Kärnbränsleförvaret.

SKB delar SSM:s syn att det är angeläget med utbildningsinsatser och kunskapshantering inom området långsiktig säkerhet. SKB har sedan genomförandet av SR-Site förstärkt kapaciteten för analys av långsiktig säkerhet och kommer att, som hittills, utbilda nya medarbetare huvudsakligen genom deltagande i säkerhetsanalysprojekt.

SKB anser att det fortsatt föreligger ett behov av att utveckla metodiken för kvalitetssäkring av säkerhetsanalysen. SKB bedömer att rutiner för bland annat projektstyrning och rapporthantering (särskilt sak- och kvalitetsgranskning) fungerar väl; i dessa fall används de företagsövergripande rutiner som SKB tagit fram och ständigt utvecklar. Vad gäller rutiner för kvalitetssäkring av data finns ett behov av förbättring då de rutiner som användes inom SR-Site upplevdes som komplicerade och onödigt arbetskrävande. Nya rutiner prövas i säkerhetsanalysen för utbyggnaden av SFR, se avsnitt 18.3. Dessa kommer att utvärderas och användas som underlag för att utveckla förbättrade rutiner för PSAR för Kärnbränsleförvaret. Det finns också ett behov av mer utvecklade och standardiserade rutiner för kvalitetssäkring av beräkningsmodeller och beräkningar. SKB avser att i detta fall ta del av erfarenheter från industrigrenar som har stora inslag av krävande beräkningar. SSM har i granskningen av Fud-program 2010 också aviserat att man avser att ta upp frågan om kvalitetssäkring då myndighetens granskning av SR-Site genomförs, och SKB har därför en beredskap att hantera de synpunkter som eventuellt framkommer.

18.3 Analys av SFR:s långsiktiga säkerhet

Analys av den långsiktiga säkerheten för SFR och den planerade utbyggnaden bedrivs inom projektet SR-PSU. Metodik och rapporter som tas fram inom projektet motsvarar i stort de som togs fram vid den senaste säkerhetsanalysen för Kärnbränsleförvaret, SR-Site.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 presenterades planerna för SR-PSU vilka baserades på erfarenheter och granskningskommentarer från de tidigare säkerhetsanalyserna, SR-Can (SKB 2006b) och SAR-08 (SKB 2008a). SSM hade inga invändningar mot de grundläggande delarna i SKB:s säkerhetsanalysmetodik. Samtidigt konstaterades att redovisningen i Fud-program 2010 var knapphändig och att ingen ny vidareutveckling eller några betydande insikter hade tagits med. En förklaring till detta var att insikter från arbetet med SR-Site ännu inte hade formulerats. SSM omnämnde särskilt behovet av insatser inom säkerhetsanalysen för låg- och medelaktivt avfall. Så som SKB själva påpekade återstod en hel del arbete med att etablera redovisningen på den nivå som SKB:s egen metodik föreskriver. SSM bedömde att SKB, med tanke på erfarenheterna från SR-Site, bör ligga i framkant inom området säkerhetsanalys och bör ha goda möjligheter att bidra till den internationella utvecklingen inom området.

Program

Inom säkerhetsanalyserna för SFR och dess utbyggnad tas ett antal rapporter fram. Dessa kommer att ingå i ansökan för ett utbyggt SFR och färdigställas utifrån projektets tidsplan. Under arbetet kan ytterligare forsknings- och utvecklingsbehov komma att identifieras. Dessa presenteras i projektets huvudrapport. Förutom att ta fram denna huvudrapport omfattar arbetet med säkerhetsanalysen ett antal olika aktiviteter som i huvudsak presenteras i rapportform. Alla egenskaper, händelser och processer (features, events, processes – FEP) av betydelse för förvarssystemet sammanfattas i en FEP-rapport. Då stora delar av förvarssystemet och dess omgivning är detsamma som för Kärnbränsleförvaret kommer FEP-rapporten, så långt som möjligt, att baseras på arbete som redan utförts inom SR-Can och SR-Site.

En nödvändig del av en säkerhetsanalys är att redovisa förståelsen av de processer som kan ske i förvarssystemet och dess omgivning. Denna processförståelse utgår från de identifierade egenskaperna, händelserna och processerna, och bygger på den forskning som bedrivs inom och utanför SKB. I de senaste säkerhetsanalyserna för Kärnbränsleförvaret, SR-Can och SR-Site, utgick processrapporterna från en fördefinierad mall. En motsvarande mall används för säkerhetsanalysen för ett utbyggt SFR och processrapporterna kommer att få en liknande struktur. Som en del av säkerhetsanalysen kommer processrapporter att tas fram för följande delar:

- Geosfär.
- Avfall.
- Tekniska barriärsystem.
- Klimat.
- Biosfär och ytsystem.

Data som används i SR-PSU kommer att presenteras och kvalificeras i en datarapport. Den kommer att följa ett liknande upplägg som datarapporten för SR-Site. Indata som ingår i analysen sammanställs i en indatarapport. Dessa rapporter är en del av projektets QA-dokumentation.

Alla modeller för beräkning av radionuklidtransport som användes i SAR-08 har implementerats i en ny kod. Vidare har en mer detaljerad känslighetsanalys än den som utfördes inom SAR-08 genomförts. I SR-Site bedrevs en omfattande utveckling inom området biosfärmodellering, något som nu fortsatt i SR-PSU. Detta innefattar insamling av platsspecifika data, samt utveckling av modeller och modelleringsverktyg. De modeller som används inom SR-PSU ska, där det är tillämpligt, vara baserade på de resultat som tagits fram inom SR-Site. På motsvarande sätt kommer resultat från SR-PSU, där det är möjligt, att användas för framtida säkerhetsanalyser för Kärnbränsleförvaret.

Inom utbyggnadsprojektet för SFR, bedrivs arbete avseende förvarsutformning i samarbete mellan projektering, säkerhetsanalys och teknikutveckling. Vid teknikval och dimensionering beaktas förvarskomponenternas långtidsegenskaper. Här ingår dels att utveckla de tekniska barriärerna som bentonit och betongkonstruktioner, dels att utveckla tunnelåterfyllning och pluggning.

Arbetet med att ta fram beskrivningar av initialtillståndet sker även detta i samarbete med andra delar av projektorganisationen. I stället för de produktionsrapporter som utgjorde en del av ansökan för Kärnbränsleförvaret kommer för SR-PSU:s del en rapport att tas fram, där initialtillståndet beskrivs.

I SR-PSU ingår att ta fram beskrivningar av förvarets referensutveckling. Detta arbete baseras i hög grad på motsvarande arbete i SR-Site, men vissa förvarsspecifika modifieringar är nödvändiga. Bland annat kommer beskrivningen av den framtida klimatutvecklingen att hanteras annorlunda. Detta beror bland annat på att den tidsperiod som analyseras skiljer sig mellan ett förvar för kortlivat avfall och ett förvar för använt kärnbränsle eller långlivat avfall. Analysperioden för SR-PSU är som längst 100 000 år, medan motsvarande tidsperiod för långlivat avfall och använt kärnbränsle är 1 000 000 år. Vissa frågeställningar förändras också, exempelvis är tidpunkten för en framtida glaciation/permafrost en central fråga för ett förvar för kortlivat avfall, medan det för Kärnbränsleförvaret är viktigare att analysera hur tjock en framtida inlandsis kan bli eller hur djupt framtida permafrost kan nå. Även den framtida utvecklingen av ytsystemen/biosfären baseras på de modeller som användes i SR-Site. Däremot kommer utvecklingen av barriärsystemen att skilja sig åt i säkerhetsanalysen för ett utbyggt SFR jämfört med för Kärnbränsleförvaret, bland annat eftersom avfall och barriärsystemet skiljer sig åt.

De säkerhetsfunktioner som används i SR-PSU utgår från de som användes i SAR-08. Säkerhetsfunktionerna kommer att användas för att ta fram scenarier på samma sätt som i SAR-08, men även till att uttrycka krav och önskemål avseende förvarets långsiktiga funktion.

19 Klimatutveckling

I det tidsperspektiv som säkerheten studeras för SKB:s olika slutförvar (Kärnbränsleförvaret, SFR och SFL), det vill säga 100 000-tals år och längre, har klimatet i Skandinavien varierat kraftigt tillbaka i tiden. Det har skiftat från varma interglaciala förhållanden liknande dem vi har i dag, till perioder med fulla istidsförhållanden. Även om klimatet i sig inte har stor direkt inverkan på förvarens funktion, kommer andra processer relaterade till framtida klimatvariationer sannolikt att kunna ha en stor inverkan. Det gäller till exempel tillväxten av inlandsisar och permafrost samt förändringarna av havsytans nivå. Dessa processer påverkar i sin tur till exempel grundvattenflöde, grundvattenkemi och spänningar i jordskorpan, vilka är av vikt för förvarens funktion. Klimatet vid markytan påverkar dessutom biosfärens och landskapets utveckling. Biosfären styr i sin tur till stor del människans aktiviteter, som ska kunna fortgå i landskapet utan att människan påverkas av närheten till slutförvaren.

Det övergripande syftet med klimatforskningsprogrammet vid SKB är att förse säkerhetsanalyserna med vetenskapligt underbyggda scenarier för framtida klimatutveckling vilka sedan ligger till grund för analyserna av långsiktig förvarssäkerhet. Viktiga delar i detta arbete är att i) öka processförståelsen där viktiga kunskapsluckor förekommer, ii) validera modeller som används i klimatforskningsprogrammet (permafrost-, inlandsis- och isostatiska modeller) och iii) samla in och validera indata till dessa modellsimuleringar. Ett annat viktigt syfte med klimatforskningsprogrammet är att förse övriga ämnesområden i SKB:s säkerhetsanalyser, med klimatologiska indata och randvillkor för olika typer av beräkningar.

19.1 Klimatscenarier i SKB:s säkerhetsanalyser

Liksom konstaterats i tidigare Fud-program, är det inte möjligt att förutsäga framtida klimat i de långa tidsperspektiv (100 000 år och mer) som omfattas av SKB:s säkerhetsanalyser. Däremot går det att konstruera vetenskapligt underbyggda scenarier för olika tänkbara framtida klimatförändringar, bland annat baserat på kunskap om naturliga historiska klimatvariationer och simuleringar av framtida klimat. Det är med andra ord möjligt att relativt väl beskriva inom vilka gränser klimatet i Skandinavien kan komma att variera, även i mycket långa tidsperspektiv. Inom dessa gränser kan vissa karakteristiska klimattillstånd (tempererat, periglacialt och glacialt klimattillstånd) identifieras som är av vikt för förvarens funktion. Liksom tidigare fokuserar SKB därför forskningsinsatserna inom klimatområdet på att identifiera och förstå förhållanden och processer inom dessa klimattillstånd. Om säkerhetskraven uppfylls, givet de olika tänkbara klimattillstånden samt under övergångar mellan dem, behöver man i analysen av långsiktig säkerhet ta mindre hänsyn till den faktiska framtida klimatutvecklingen i tid och rum. För analysen av den långsiktiga säkerheten för SFR är den förväntade klimatutvecklingen under det kommande tiotusentalet åren däremot av större vikt, se nedan.

SKB:s angreppssätt att hantera den stora osäkerhet som finns i kunskapen kring framtida klimatutveckling innebär att identifiera, beskriva och analysera effekterna av ett brett spektrum av tänkbara framtida klimatutvecklingar. Dessa spänner från varma klimat dominerade av kraftig global uppvärmning, till klimat dominerade av glaciala istidsförhållanden. Ett av klimatfallen utgörs därför av en framtida utveckling baserat på en upprepning av förhållanden rekonstruerade för den senaste glaciala cykeln, inklusive istiden Weichsel. Eftersom detta är den glaciala cykel vi har mest kunskap om, ger detta klimatfall viktig processkunskap om hur de olika klimatrelaterade processerna (inlandsis, permafrost, strandlinjeförskjutning) fungerar och samverkar.

Förutom att denna klimatutveckling används vid analysen av långsiktig säkerhet, utgör den även en lämplig vetenskaplig utgångspunkt för en utökad analys av klimatets påverkan på de olika förvaren. Baserat på denna referensutveckling, SKB:s kunskap om möjliga klimatvariationer och SKB:s kunskap om förvarens funktion och säkerhet, identifieras på ett strukturerat sätt ett flertal andra klimatutvecklingar. Dessa fall täcker in alla tänkbara situationer där klimatrelaterade processer potentiellt skulle kunna ha en större påverkan på förvarets funktion än i referensutvecklingen. Även för dessa fall beskrivs hur de olika klimattillstånden avlöser varandra över tiden samt hur parametrar som

inlandsistjocklek, permafrostmäktighet, strandlinjeförskjutning och klimat varierar. Vid beskrivning av möjliga framtida klimatförändringar är det viktigt att även behandla fall där en mänsklig påverkan på klimatet är inkluderad.

Näslund et al. (2013) redogör för hur klimat och klimatrelaterade processer hanteras vid säkerhetsanalyser av SKB:s olika typer av förvar. En av huvudsatserna är att klimatscenerierna i en viss säkerhetsanalys behöver anpassas till de specifika frågeställningar som det aktuella förvarskonceptet ger upphov till. Detta betyder att uppsättningen av tänkbara och relevanta klimatscenerier varierar beroende på vilken typ av förvar/avfall som analyseras. Ett exempel på detta är säkerhetsanalysen SR-Site för Kärnbränsleförvaret och säkerhetsanalysen SR-PSU för utbyggnaden av SFR. Beroende på olika förvarsdjup, olika livslängd på radionuklidinventariet med mera, så behöver uppsättningen av framtida klimatscenerier skilja sig till viss del mellan de två säkerhetsanalyserna (Näslund et al. 2013).

De klimatutvecklingar som konstrueras för SKB:s säkerhetsanalyser ska inte ses som prediktioner av framtida klimat. De utgör i stället relevanta exempel och gränssättande fall för den framtida utvecklingen, där klimatrelaterade processer beskrivs på ett realistiskt och integrerat sätt i ett 100 000-årsperspektiv och längre.

De klimatutvecklingar som inkluderar en mänsklig påverkan, genom en ökad växthuseffekt, innefattar en global höjning av havsytan orsakad av en ökad avsmältning av inlandsisar och glaciärer samt en termisk expansion av världshavens ytvatten. Att inkludera sådana klimatutvecklingar är nödvändigt med tanke på att Forsmark ligger i direkt anslutning till dagens kustlinje.

I referensutvecklingen är rekonstruktionen av inlandsisen under Weichsel viktig för hur de rådande klimattillstånden avlöser varandra. Rekonstruktion av inlandsisen under Weichsel, vars resultat beskrevs i Fud-program 2007, används i sin tur för att studera strandlinjeförskjutning, se avsnitt 19.4, permafrost, se avsnitt 19.5 och förekomst av glacialt inducerade jordskalv, se avsnitt 26.8.

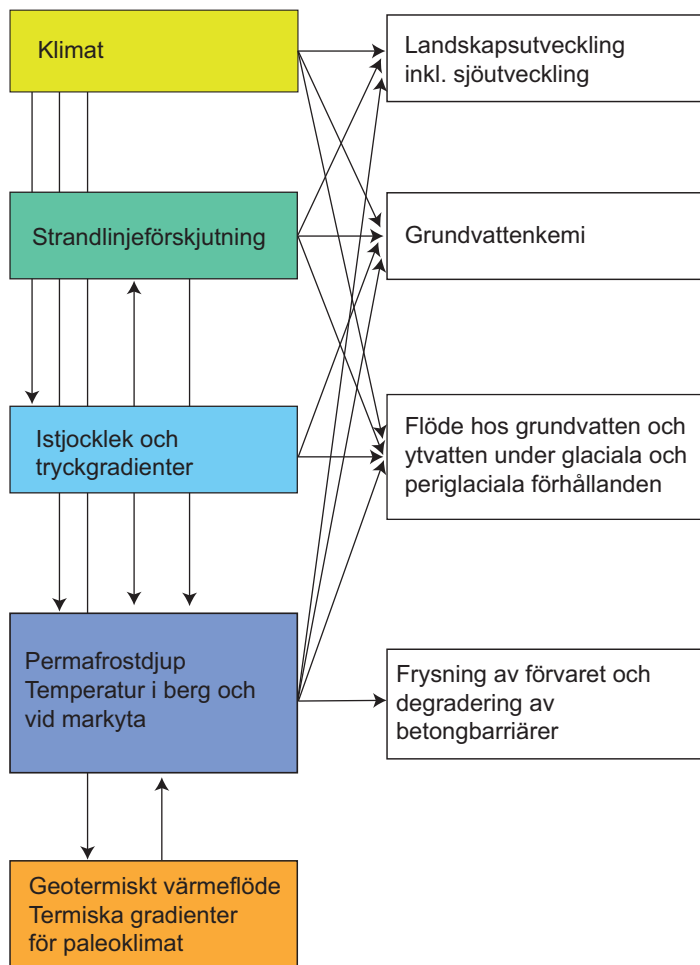
För att öka förståelsen av framtida klimatutveckling och klimatvariabilitet har SKB under de senaste sex åren även genomfört studier inom området klimatvariationer. Dessa har inkluderat studier av tänkbara framtida klimat med hjälp av klimatmodeller, såväl som studier av historiska klimatvariationer från geologiska klimatarkiv som sammanställningar av klimatologisk information för utvalda perioder under Weichselistiden, se avsnitt 19.6.

Med nuvarande angreppssätt och säkerhetsanalytiska metodik utgör de identifierade klimattillstånden – och förekomsten av dessa i tid och rum i de utvalda klimatfallen – en bas för SKB:s säkerhetsanalyser. Klimatprogrammet utförs i nära samarbete med forskningsprogrammen för hydrogeologi, geokemi, ytnära ekosystem, termo-hydro-mekaniska processer, buffert och kapsel, se figur 19-1.

SKB beskriver i sitt klimatprogram dels en referensutveckling som innehåller en upprepning av förhållanden rekonstruerade för senaste glaciala cykeln, dels alternativa framtida klimatutvecklingar baserade på specifika frågeställningar för enskilda säkerhetsanalyser/förvarskoncept. De alternativa utvecklingar som utreds är:

- Ett kallare och torrare klimat än i referensutvecklingen, vilket resulterar i djupare permafrost och längre perioder med periglacial klimatdomän, se avsnitt 19.5. Flera alternativa utvecklingar behandlas. En av de alternativa utvecklingarna innehåller den tidigaste förväntade förekomsten av permafrost, av särskild relevans vid analysen av långsiktig säkerhet för det förvarskoncept som används vid SFR.
- Ett kallare klimat med större nederbörds mängder som kan bygga upp en tjockare inlandsis eller förekomst av inlandsis under längre perioder än i rekonstruktionen av den senaste glaciala cykeln, se nedan i detta avsnitt. Här utnyttjas även geologiska spår av andra nedisningar än den senaste. Flera alternativa utvecklingar behandlas.
- Ett framtida klimat dominerat av global uppvärmning, det vill säga varmare än under den senaste glaciala cykeln, se avsnitten 19.4 och 19.6. Flera alternativa utvecklingar behandlas.

Forskningsområdet kring framtida och historisk klimatutveckling är i dag mycket aktivt. Som komplement till den egna forskningen följer därför SKB fortlöpande aktuell forskning i internationella vetenskapliga tidskrifter, på vetenskapliga möten, samt arbetet inom organ eller organisationer som behandlar klimatfrågor.



Figur 19-1. Exempel på hur olika delar inom klimatprogrammet är kopplade till andra delar av en säkerhetsanalys. Exemplet är från säkerhetsanalysen SR-PSU för den planerade utbyggnaden av SFR. Färgade rutor visar områden som studeras inom klimatprogrammet. Vita rutor visar andra aktiviteter inom SR-PSU där data från klimatprogrammet används. Pilarna anger huvudsakliga dataflöden.

19.2 Inlandsisdynamik och glacial hydrologi

Det glaciala klimattillståndet råder i områden som täcks av glaciärer eller inlandsisar. De viktigaste forskningsområdena för SKB för detta klimattillstånd är inlandsisdynamik, glacial hydrologi och Weichsels glaciala historia.

Under de senaste 800 000 åren har en typisk glacial cykel omfattat en tidsperiod av omkring 100 000 år. Vid tiden för den maximala isutbredningen under de glaciala perioderna täcktes hela Sverige av inlandsis. Medelutbredningen hos inlandsisarna över Skandinavien under kvartärperioden är dock betydligt mindre än så; områdena kring Forsmark har sannolikt varit fria från inlandsis under större delen av dessa 800 000 år.

Inlandsisens termiska och hydrologiska egenskaper bestämmer hur isen påverkar sitt underlag (inklusive berg och grundvatten) och därmed också hur den påverkar ett slutförvar. Det glaciala smältvattnet är jonfattigt och syrerikt. Grundvattenbildningen under perioder med glacialt klimattillstånd medför därför att vatten med sådana egenskaper transporteras nedåt i berget. En del av SKB:s arbete går därför ut på att studera hur grundvatten bildas och transporteras genom berget under glaciala förhållanden, se avsnitt Inlandsisars hydrologi nedan, samt hur ett grundvatten med glacialt ursprung påverkar till exempel en buffertlers egenskaper, se kapitel 25 Buffert och återfyllning. När en inlandsis växer till och drar sig tillbaka påverkas bergspänningarna i det berörda området, vilket kan ge en reaktivering av befintliga sprickzoner i form av glaciala skalv, se avsnitt 26.8 Reaktivering – rörelse längs befintliga sprickor. En närvaro av en inlandsis påverkar även bergets termiska, hydrauliska, och mekaniska (THM) processer, se avsnitt 26.4.2 Hydrogeologi i det djupa berget.

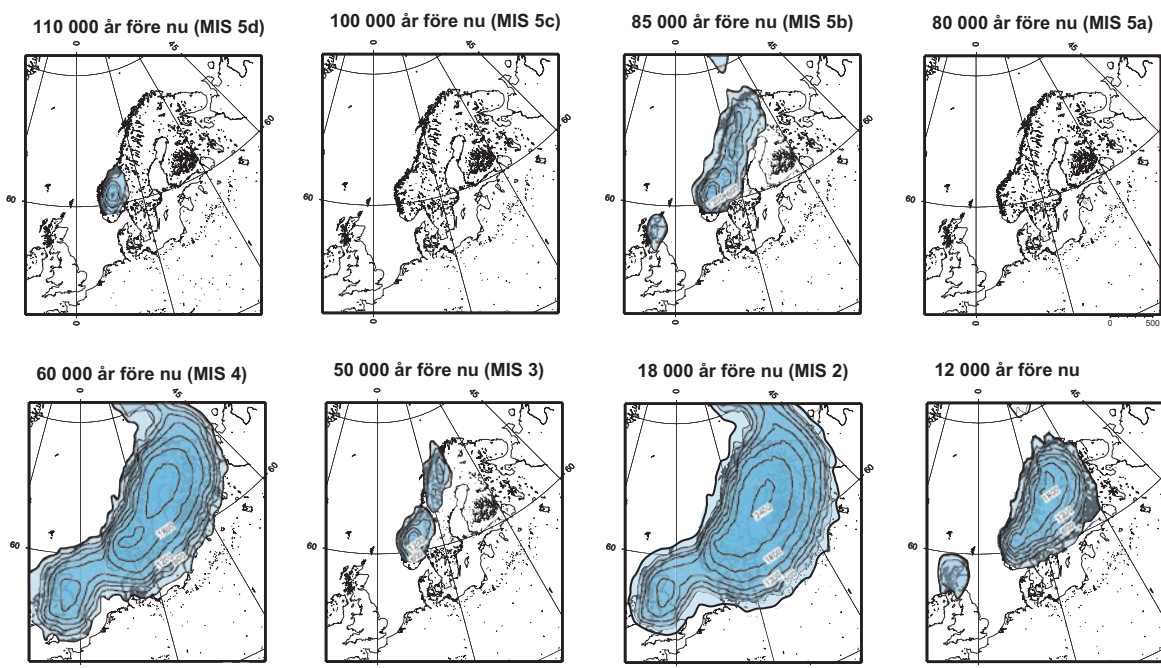
Den numeriska rekonstruktionen av inlandsisen under Weichsel (figur 19-2), vilken beskrevs i Fud-program 2007, används fortfarande i SKB:s rekonstruktion av förhållandena under senaste istiden. Även den metodik som beskrev hur extrema klimat inom den glaciala domänen studeras, till exempel rörande maximala istjocklekar över Forsmark, är fortfarande aktuella i klimatprogrammet. Resultaten visade att den maximala istjockleken över Forsmark i rekonstruktionen av Weichsel är omkring 2 900 meter, medan den största istjockleken under de senaste två miljoner åren (under den så kallade Saaleglaciationen) uppskattats till omkring 3 400 meter.

Såsom redovisats i Fud-program 2010, har den rekonstruerade inlandsisutbredningen under Weichsel använts som indata i modellsimuleringar av strandlinjeförskjutning, permafrost, och spänningsförändringar i jordskorpan. Det senare är av intresse vid studier av stabiliteten hos förkastningar och förekomst av glacialt inducerade jordskalv, se avsnitt 26.8 Reaktivering – rörelse längs befintliga sprickor.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SSM noterade vid sin granskning av Fud-program 2010 att SKB hade bemött kommentarerna som myndigheten framförde i granskningen av Fud-program 2007. SSM såg positivt på projektet Greenland Analogue Project (GAP) och ansträngningarna att förbättra den konceptuella förståelsen av hydrologi och hydrogeologi under glaciala förhållanden. SSM ansåg att studien som planerades för att överföra kunskapen från Grönland till Fennoskandiska förhållanden var angelägen så att den framtagna informationen blir relevant för säkerhetsanalyserna för de befintliga och planerade slutförvarsanläggningarna. I säkerhetsanalyserna bör även konsekvenserna för modellosäkerheterna redovisas.

Liksom i granskningen av Fud-program 2007 saknade SSM i Fud-program 2010, hur de beskrivna insatserna är kopplade till planerna för studier av växelverkan mellan mekaniska och hydrauliska processer, som exempelvis beskrivs i avsnittet grundvattenströmning och integrerad modellering – termo-hydro-mekanisk utveckling.



Figur 19-2. Exempel på iskonfigurationer och isytans nivå (300 meter ekvidistans) i den rekonstruktion av Weichselglaciationen som används i SKB:s säkerhetsanalyser. Värt att notera är bland annat att inlandsisens utbredning under den långa perioden kallad Marina Isotopstadium 3 (MIS 3) är mycket begränsad över Sverige. I figuren exemplifierad med en bild av isen för 50 000 år sedan, där man ser att området kring Forsmark är isfritt. I motsats till den klassiska bilden av Weichselnedisningen, där hela Sverige är täckt av is från någon gång under MIS 4 (med start för omkring 70 000 år sedan) till slutet av MIS 2 (för 12 000 år sedan), tyder information från SKB:s klimatprogram och från övrig forskning, på att en lång isfri period rådde under delar av MIS 3, det vill säga mitt under den senaste istiden.

SSM såg positivt på att SKB hade studerat vittring och erosion, så kallad denudation (Olvmo 2010). Myndigheten ansåg dock att vidare analyser kan vara befogade beroende på hur SKB värderar effekter av en större glacial erosion i de kommande säkerhetsanalyserna. Myndigheten ansåg att SKB ytterligare bör belysa möjliga osäkerheter i uppskattade värden för glacial erosion.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

Liksom påpekat av SSM finns kopplingar mellan SKB:s klimatprogram och programmet för termiska, hydrauliska, och mekaniska (THM) processer samt programmet för hydrogeologi, vilka beskrivs i kapitel 26 Geosfär. Dessa kopplingar kan exemplifieras genom att information från SKB:s klimatprogram kring inlandsisar (detta avsnitt) och permafrost (avsnitt 19.5) i SR-Site användes för att sätta upp randvillkor för THM-studier av ”hydraulic jacking” (sv ung hydraulisk spräckning) (Lönnqvist och Hökmark 2010). Kopplingarna mellan SKB:s klimatprogram och programmet för hydrogeologi kan exemplifieras genom att resultat från studierna kring inlandsisens egenskaper och den glaciala historien under Weichsel i SR-Site användes till att sätta upp randvillkor för hydrogeologiska simuleringar av grundvattenflöde under glaciala förhållanden (Jaquet et al. 2010, Vidstrand et al. 2010a, b, 2012, Selroos et al. 2012). På liknande sätt användes resultat från permafroststudierna utförda inom SKB:s klimatprogram (avsnitt 19.5) till att ansätta randvillkor och förhållanden för simuleringar av grundvatten- och markvattenflöde under periglaciala förhållanden (Bosson et al. 2010, Vidstrand et al. 2010a, b). Ytterligare kopplingar mellan ämnesområden, denna gång mellan klimat och ytnära ekosystem/landskapsutveckling, finns exemplifierade i Lindborg et al. (2010, 2012, 2013).

Glacialgeologisk information

För att få en bättre underbyggd och mer detaljerad bild av förhållanden under senaste istidscykeln, har fortsatta studier av Weichsels glaciala historia genomförts. Studierna rör både inlandsisens rumsliga och tidsmässiga utbredning som beskrivs i detta avsnitt, samt kvantitativa klimatrekonstruktioner för utvalda tidsperioder för att studera inom vilka gränser klimatet i Skandinavien varierade under den senaste istiden, se avsnitt 19.6.

I Fud-program 2010 redovisades forskning vilken har bidragit med information som reviderat den klassiska bilden av Weichselnedisningen. Tidigare har man antagit en mycket lång oavbruten period av nedisning över Sverige från någon gång under perioden Marina Isotopstadium 4 (MIS 4) under mittersta delen av Weichsel (med start för omkring 70 000 år sedan) fram till senaste deglaciationen i slutet av perioden MIS 2 (för omkring 12 000 år sedan). Den nya bilden visar en mer dynamisk inlandsis, och därmed ett mer dynamiskt klimat, med isfria förhållanden i stora delar av Skandinavien och Sverige under delar av MIS 3, det vill säga mitt under rådande istid. Resultaten är samstämmiga med den bild av inlandsisens utveckling som används i SKB:s referensutveckling.

Efter studien av förhållandena under mittersta delen av Weichsel, MIS 3, initierades motsvarande studier för den tidiga delen av Weichsel, där paleoklimat, se avsnitt 19.6, och isutbredning studeras för de interstadiala perioderna MIS 5c–e med hjälp av makrofossil, chironomider, pollen och vegetation. Dessa studier har pågått under den senaste treårsperioden, och ska enligt planerna redovisas under 2013.

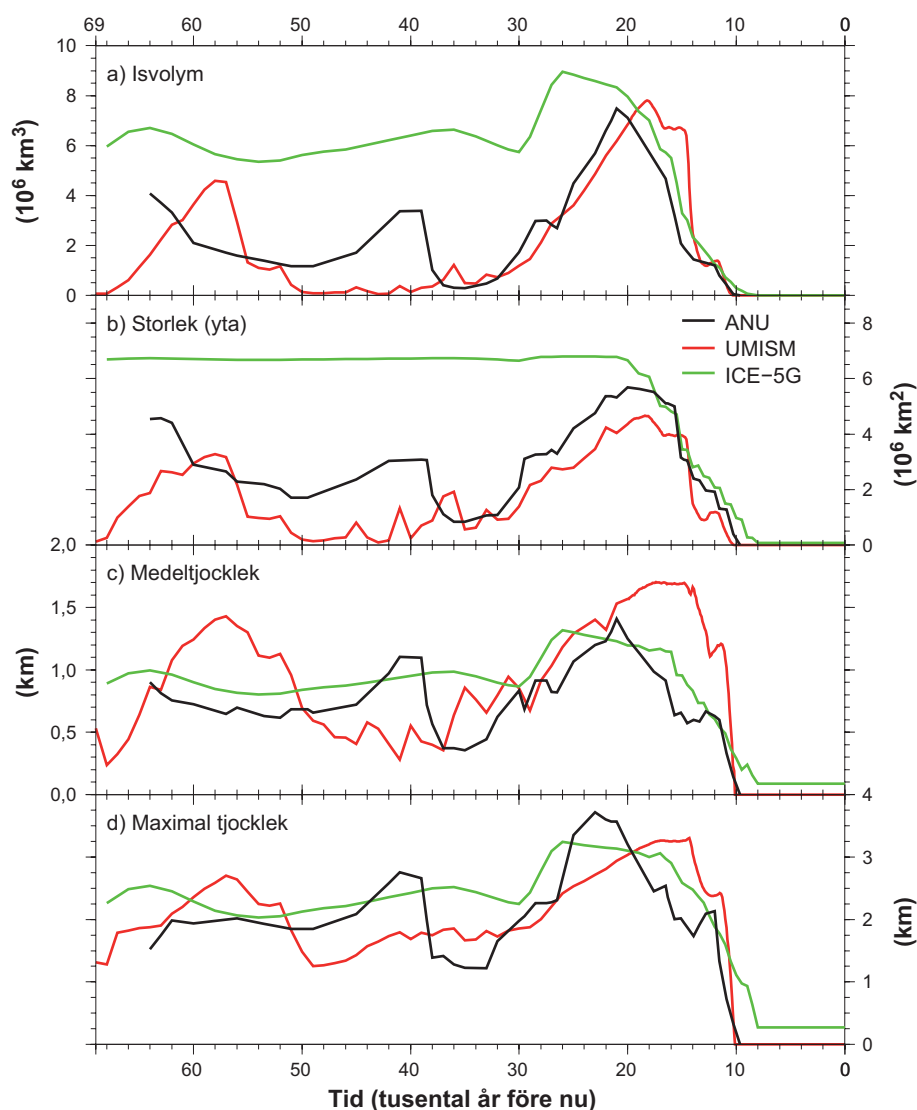
Resultaten från studierna hjälper till att minska osäkerheterna i Weichsels glaciala historia. Den har direkt bidragit med viktig information om olika delar av de perioder som bygger upp senaste istiden Weichsel, se till exempel sammanställning av Skandinavien glaciala historia i Lundqvist (2011, figur III.3). Det gör att säkerhetsanalyserna har ett bättre underlag för referensutvecklingen baserad på upprepningen av Weichselglaciationen, och en bättre bild av den variabilitet i nedisningshistoria som kan förekomma under en glaciation.

Kunskapen om isens konfiguration och utveckling vid senaste glaciala maximumet för cirka 20 000 år sedan, samt för den efterföljande deglaciationen av Skandinavien, är sedan tidigare god.

Numerisk inlandsissimulering

Rekonstruktionen av inlandsisen som används i SKB:s arbete (figur 19-2) har tagits fram med University of Maine Ice Sheet Model (UMISM). Denna inlandsisrekonstruktion har utvärderats i två studier, dels i en studie vid Uppsala universitet (Schmidt et al. 2010), dels i en studie i ett samarbete

mellan University of Calgary och Uppsala universitet. Båda studierna använder Glacial Isostatic Adjustment modeller (GIA) för att analysera den isostatiska responsen givet en viss islasthistorik. I detta arbete har SKB:s rekonstruktion av Weichselisens utveckling jämförts mot inlandsisrekonstruktioner gjorda med modellerna ANU (Lambeck et al. 2010) och ICE-5G (Peltier 1994). De senare två modellerna baseras på rekonstruktioner av isostasi/havsnivåvariationer medan UMISM baseras på inlandsisars termodynamik. En del av studien syftar till att se hur väl den isostatiska respons som de olika inlandsisrekonstruktionerna ger upphov till stämmer överens med dagens isostatiska höjning av jordytan i Skandinavien såsom observerad i gps-studier. Preliminära resultat från jämförelsen är publicerade i Schmidt et al. (2010). Resultaten visar på tydliga skillnader mellan de olika inlandsisrekonstruktionerna, se figur 19-3, men även att alla tre rekonstruktioner kan återskapa det generella mönstret för jordskorpan isostatiska höjning, beroende på val av jordparametrar i GIA-modellen. Resultat från dessa studier har även presenterats vid ett antal vetenskapliga konferenser (Lund et al. 2011a, b, 2012, Schmidt et al. 2010).



Figur 19-3. Exempel på jämförelse av tre rekonstruktioner av inlandsisutvecklingen under Weichsel; UMISM (SKB 2010w), ANU (Lambeck et al. 2010) och ICE-5G (Peltier 2004). Jämförelsen visar både likheter och skillnader mellan rekonstruktionerna, och utgör en del av en analys av den inlandsisrekonstruktion (UMISM) som används i SKB:s säkerhetsarbete.

Inlandsisars hydrologi

Den teoretiska kunskapen, fram till år 2007, om hur vatten flödar i och under en glaciär eller inlandsis, samt hur dessa kunskaper tillämpas i modellsimuleringar har tidigare sammanställts och rapporterats i Jansson et al. (2007). I Jansson (2010) sammanfattas kunskapen fram till 2010 innan resultat från projektet GAP börjat erhållas, om inlandsisars hydrologi erhållen genom observationer från Grönland och Antarktis. Många av de studier som beskrivs i rapporten passar in i någon av kategorierna i) väldokumenterade processer från mindre glaciärer verifieras på inlandsisskala, eller ii) processer specifika för inlandsisar. Dessa kategorier utgör basen för litteraturstudien.

Sammanställningarna visar att glacialhydrologiska fältobservationer övervägande har genomförts på dalglaciärer och inte på inlandsisar, vilket är mest relevant för SKB:s säkerhetsanalysarbete. Kunskapen kring glacialhydrologiska processer vid inlandsisar har varit bristfällig och bristen på processförståelse har gjort att processerna i många fall är svåra att konceptualisera i dagens storskaliga inlandsismodeller. För att adressera dessa frågor har SKB, tillsammans med systerorganisationerna Posiva i Finland och NWMO (Nuclear Waste Management Organisation) i Kanada, sedan 2008 drivit det omfattande forskningsprojektet GAP på västra Grönland för att studera bland annat hydrologiska processer vid en befintlig inlandsis, se avsnitt 19.7. Detta projekt har bidragit med, och kommer under de närmaste åren att bidra ytterligare med en stor mängd ny och unik information kring inlandsisars glacialhydrologiska system. Projektet syftar till att beskriva det hydrologiska systemet både på inlandsisens överyta, inne i isen, i övergången mellan is och underlag, samt i berget under isen, se vidare avsnitt 19.7.

Inom samma undersökningsområde på västra Grönland bedriver SKB sedan 2010 även en studie (Greenland Analogue Surface Project, Grasp) vilken syftar till att i) studera ythydrologin i den periglaciala miljön (samarbete med Stockholms universitet), se avsnitt 26.4.1 Ythydrologi och ytnära hydrogeologi, samt ii) studera hur ämnen fördelas och transporteras i denna miljö (samarbete med Umeå universitet), se avsnitt 27.7 Effekter av långtidsvariationer och 27.8 Landskapsutveckling och avlagringar. Det övergripande syftet med dessa studier är att visa hur dessa processer kan komma att verka i Forsmarksområdet under framtida perioder med ett periglacialt (kallt och torrt) klimat med permafrost i området.

Program

Studierna av paleoklimat under olika perioder av Weichsel genom analys av sediment från platsen Sokli i norra Finland kommer att fortgå och i vissa fall avslutas under kommande Fud-period, se avsnitt 19.6. Dessa studier kommer, liksom under den gångna Fud-perioden, att fortsätta att även bidra med information kring inlandsisens utbredning under Weichselperioden.

Numerisk inlandsissimulering

Studien som jämför SKB:s inlandsisrekonstruktion med modellerna ANU och ICE-5G, se ovan, kommer att drivas vidare och avrapporteras. Även samarbetet mellan University of Calgary och Uppsala universitet vad gäller utvärderingen av UMISM-rekonstruktionen av Weichselisen (Benchmark of UMISM for Northern Europe with 1D laterally homogeneous and 3D spherical finite-element models – Comparison to sea-level, GPS and GRACE data in Europe) kommer att slutföras.

Resultatet från båda studierna kommer att användas till att diskutera osäkerheten i rekonstruktionen av Weichselnedisningen (figur 19-2), samt till att ytterligare förbättra beskrivningarna av den glaciala historien för Skandinavien.

I tillägg till SKB:s egna studier och övriga publicerade resultat angående maximala istjocklekar under Saale-glaciationen (rapporterade i SKB 2010w, avsnitt 5.4) planerar SKB att genomföra en kompletterande modellstudie kring istjocklekar över Forsmark under Saale-nedisningen (den största nedisning som förekommit under kvartärperioden). En möjlighet är här att använda en kombination av inlandsissimulering och klimatsimulering för hela eller utvalda delar av denna nedisningsperiod. Denna planerade studie är i första hand av relevans för Kärnbränsleförvaret och SFL.

Inlandsisars hydrologi

Det vetenskapliga ämnesområde som beskriver hydrologin vid och under inlandsisar är i snabb framfart, både genom projektet GAP, se avsnitt 19.7, och många andra forskargrupper studier av utvecklingen av den grönländska inlandsisen i ett varmare framtida klimat.

Kunskapsläget för teorierna kring inlandsisdynamik och glacialhydrologi, som sammanställdes och avrapporterades i SKB (2006c), kommer att uppdateras i samband med slutrapporteringen av projektet GAP.

Information om den basala hydrologin hos inlandsisar, till exempel hur den hydrauliska tryckbildningen varierar i olika rumsliga och tidsmässiga skalor, är av stor vikt vid uppsättningen av simuleringar av grundvattenflöde under glaciala förhållanden. SKB avser att arbeta vidare inom detta område med att studera hur den glaciala hydrologin kan och bör konceptualiseras i hydrogeologiska studier, se avsnitt 19.7 och 26.4.2 Hydrogeologi i det djupa berget. I detta sammanhang utgör GAP en viktig del. Resultaten kommer att öka förståelsen av de hydrologiska och geokemiska förhållandena i och omkring en inlandsis samt specifikt adressera frågor kring hur en inlandsis påverkar grundvattenflöde och kemi kring ett slutförvar.

I anslutning till GAP genomför SKB en studie kring inlandsismodellering, med fokus på basala förhållanden och basal hydrologi i inlandsismodeller. I denna studie (Numerical modelling to further understand thawed versus frozen conditions at the base of the ice sheet) används data insamlade från studieområdet för GAP (meteorologisk information om smältvattenproduktion på ytan, isörelsedata, istjocklek, basala temperatur/hydrologiska förhållanden med mera) för simuleringar av den grönländska inlandsisen inom studieområdet för GAP.

I samband med GAP utför SKB även en studie med syftet att överföra den glacialhydrologiska kunskapen erhållen från GAP till skandinaviska förhållanden, inklusive projektdelar som specifikt behandlar området kring Forsmark. Denna studie (Water routing theory through ice sheets based on Greenland field data and its application to the Fennoscandian Ice Sheet) utförs som ett doktorandprojekt vid Stockholms universitet. Planerad tidpunkt för disputation är slutet av 2014.

I anslutning till GAP är SKB även medfinansierad till doktorandprojekten Modelling the hydrology in an area of the Greenland Ice Sheet, Kangerlussuaq, West Greenland with Mike-She, vilket bedrivs vid Köpenhamns universitet, samt Characterizing subglacial conditions and processes of a land terminating section of the Greenland ice sheet using geophysical methods, vilket bedrivs vid Uppsala universitet. Planerade tidpunkter för disputationer inom dessa två projekt är 2014.

Under kommande Fud-period kommer även projektet Grasp att drivas vidare, se avsnitt 26.4.1 Yhydrologi och ytnära hydrogeologi, 27.7 Effekter av långtidsvariation och 27.8 Landskapsutveckling och avlagringar.

19.3 Denudation

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SSM ansåg vid sin granskning av Fud-program 2010 att SKB ytterligare borde belysa möjliga osäkerheter i värdena för glacial erosion.

SKB borde även belysa betydelsen av att Forsmarksområdet sannolikt inte har nåtts av mer än sex glaciationer under kvartärtiden för generaliseringen av kvartärtiden och dess nedslag med avseende på erosion.

Studier kring den framtida erosionen vid Forsmark kunde vara befogade, beroende på hur SKB värderar effekter av en större glacial erosion i de kommande säkerhetsanalyserna.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

SKB avslutade 2010 ett projekt som syftade till att beskriva och kvantifiera denudation (vittring och erosion) av markytan under långa tidsperspektiv (hundratusen och en miljon år) i områdena kring Forsmark och Oskarshamn. Metoden som användes var studier av berggrundens långsiktiga morfologiska utveckling.

Hastigheten med vilken berggrunden i Sveriges kustområden nöttes ner till följd av erosion och vittring under Pliocen-Pleistocen (en fem miljoner år lång period) har i allmänhet varit låg, lägre än 100 meter per miljon år (Riis 1996). Detta värde anger den generella nivå-sänkningen av berggrundsytan och inbegriper därför inte de förväntat högre erosionshastigheter som förekommit längs till exempel dalar och sprickzoner i berggrunden. Olvmo (2010) visar att platsen för Kärnbränsleförvaret och SFR i Forsmark ligger inom de intakta delarna av det subkambriska peneplanet, med mycket låg relief. Detta medför att även den framtida ickeglaciala denudationen förväntas vara mycket låg, i tidsperspektiv på både hundratusen år och en miljon år (upp till fem meter per miljon år i Forsmarksområdet). Även den framtida glaciala erosionen uppskattas vara relativt låg i Forsmarksområdet – i storleksordningen en till två meter per glaciationscykel. Detta låga värde på glacial erosion är ett resultat av att platsen lokalt ovanför förvaren inte ligger i en lokal dalsänka eller större sprickzon, utan i stället inom ett intakt område med låg erosionsbenägenhet. I andra lägen, med större relief och förekomst av större spricksystem, förväntas den glaciala erosionen dock kunna bli betydligt högre. Exempel på sådana områden hittas närmast 25 kilometer sydöst om Forsmark där en framtida glacial erosion i topografiska sänkor uppskattats kunna bli mer än tio meter per hundratusen år (Olvmo 2010).

Program

För att vidare klarlägga osäkerheten i de uppskattade värdena för glacial erosion i Forsmarksområdet planerar SKB att utföra en kompletterande studie kring denudation med fokus på glacial erosion. Den planerade studien är GIS-baserad och inkluderar en statistisk beskrivning och analys av glaciala överförddjupningar (geometri och läge) med hjälp av topografiska berggrundsdata från ett flertal studieområden på jorden. Områdena planeras att väljas så att både i dag nedisade områden (till exempel studieområdet för GAP på Grönland) och tidigare nedisade områden (Forsmark) analyseras.

I tillägg till detta planerar SKB att även fortlöpande följa aktuell vetenskaplig litteratur inom området denudation och glacial erosion, och inkludera denna information i kommande säkerhetsanalyser.

19.4 Isostasi, eustasi och strandlinjeförskjutning

Inom det tempererade klimattillståndet är strandlinjeförskjutning den viktigaste klimatrelaterade processen för ett slutförvar i Forsmark, oavsett förvarskoncept. Det tempererade klimattillståndet definieras som en situation utan inlandsis eller permafrost. Det utgörs med andra ord av områden med ett tempererat klimat i mycket bred bemärkelse. Det inrymmer både klimat kallare än i dag samt alla tänkbara klimat i Sverige dominerade av global uppvärmning. Strandlinjeförskjutning är nettoresultatet av isostatiska förändringar (till exempel den nu pågående landhöjningen) och eustatiska förändringar (förändringar i havsnivå).

I SR-Site breddades beskrivningen av ett varmare framtida klimat, orsakat av en ökad växthuseffekt, jämfört med tidigare säkerhetsanalyser. Två fall med olika lång initial tempererad period och olika kraftig klimatpåverkan inkluderades. Det första utgjordes av fallet Global uppvärmning, motsvarande FN:s klimatpanel, Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC:s, medium-utsläppsscenario A1B, och det andra fallet var Förlängd global uppvärmning, vilket motsvarar IPCC:s höga utsläppsscenario A2. I det första fallet utgörs de första cirka 60 000 åren vid Forsmark av tempererat klimattillstånd. Därefter blir klimatet successivt kallare, med till en början korta, men med tiden allt längre, perioder av permafrost. I slutet av denna cirka hundratusen år långa period kommer den första perioden av glaciala förhållanden. Det andra fallet domineras helt av global uppvärmning. I detta fall råder tempererat klimattillstånd under hela den kommande hundratusenårsperioden.

För studier specifikt rörande klimatet i SKB:s scenarier för global uppvärmning, se avsnitt 19.6 Klimat och klimatvariationer.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SSM såg vid sin granskning av Fud-program 2010 positivt på att SKB kommer att ta hänsyn till ny kunskap om möjliga framtida havsyttehöjningar. SSM ansåg vidare att det var angeläget att SKB fullföljde planerna att bedöma förändringar i strandlinjen vid Forsmark även i det längre tidsperspektivet som är relevant för slutförvaret för använt kärnbränsle.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Utifrån de frågeställningar som är aktuella för säkerhetsanalysen SR-PSU har klimatfallen från SR-Site reviderats och kompletterats. De två klimatfallen med global uppvärmning från SR-Site, Global uppvärmning och Förlängd global uppvärmning, har uppdaterats utifrån vetenskaplig litteratur som publicerats under de senaste åren. Eftersom framtida förändringar i havsytans nivå är av stor betydelse för dagens samhälle pågår mycket internationell forskning inom området, och en mycket stor mängd information om framtida förändringar i havsnivå har publicerats i den vetenskapliga litteraturen sedan Fud-program 2010. För dessa två klimatfall har följande litteraturstudier inom områden relaterade till havsyteförändringar genomförts och kommer att rapporteras inom ramen för SR-PSU:

- Uppdaterad kunskap om möjlig höjning av havsytan på grund av termisk expansion och avsmältning av glaciärer och inlandsisar. Studien omfattar både höjning fram till år 2100 och storlek och tidpunkt för maximal höjning vid fullbordad termisk expansion.
- Potentialen för förändringar av havscirkulationen i Nordatlanten vid global uppvärmning, inklusive uppskattad resulterande avkylning av klimatet i Skandinavien, för utvärdering av risken att global uppvärmning skulle kunna leda till ett kallare klimat i Forsmark. Slutsatsen från studien är att en framtida förändring av havscirkulationen i Nordatlanten inte kan uteslutas, samt att en sådan förändring har potential att sänka temperaturen i Skandinavien. Även under antagande om låga framtida koldioxidutsläpp skulle denna förändring av havscirkulationen dock inte kunna innebära årsmedeltemperaturer under 0 °C i Forsmark på grund av den pågående globala uppvärmningen.

Både för konstruktionen av Kärnbränsleförvaret och utbyggnaden av SFR hanterar SKB de problem som en höjning av havsnivån skulle medföra under byggtiden. Studien som beskrev möjliga framtida förändringar i havsnivån vid Forsmark fram till år 2100 i säkerhetsanalysen för Kärnbränsleförvaret (Brydsten et al. 2009) har uppdaterats inom ramen för SR-PSU med utgångspunkt från ovan beskrivna litteraturstudier. Studien inkluderar processer som eustatiska förändringar (havs nivå), isostatiska förändringar (landhöjning) samt regionala och lokala extremer i vattenstånd i dag och för år 2100. Sammanställningen har uppdaterats och inkluderar nu fler referenser kring global havsyttehöjning. Resultaten visar, liksom tidigare, att det maximala vattenstånd som kortvarigt, vid stormtillfällena, skulle kunna råda år 2100, givet ett scenario med maximal global havsyttehöjning, är runt plus tre meter för Forsmark. Sammanställningen visar vidare att osäkerheten i uppskattningar av hur mycket havsytan maximalt skulle kunna höjas till år 2100 fortfarande är mycket stor. Det är i sammanhanget viktigt att igen notera att detta vetenskapliga område är inne i en mycket intensiv fas, och revideringar av dessa siffror är att vänta.

De GIA-simuleringar som användes för att beskriva strandlinjeförskjutning i SR-Can användes i huvudsak även i SR-Site. De kompletterades dock med ny information från publicerad vetenskaplig litteratur, framför allt med avseende på möjliga framtida havsyttehöjningar, samt med information från GIA-simuleringar gjorda i 3D, vilka inkluderade en lateralt varierande tjocklek på jordskorpan, se SKB (2010w). Dessa GIA-simuleringar används även i SR-PSU tillsammans med den uppdaterade informationen om möjliga framtida havsyttehöjningar.

Program

SKB:s rekonstruktion av nedisningshistorien under den senaste istiden utvärderas genom den isostatiska respons som isens utveckling ger upphov till vid simuleringar med olika GIA-modeller, såsom beskrivits i avsnitt 19.2 Inlandsisodynamik och glacial hydrologi. Dessa studier kommer att fortsätta och avslutas under kommande Fud-period. Resultaten kommer, förutom att ge information som är användbar vid diskussion kring nedisningshistorien under Weichsel, även att ge viktig information kring antaganden som är nödvändiga att göra vid GIA-simuleringar av isostatiska förändringar i Skandinavien.

Den vetenskapliga litteraturen kring framtida förändringar i havsnivå (orsaker, verkan och konsekvenser) kommer att fortsätta växa kommande år. SKB kommer därför att fortsätta att följa forskningen inom det här området, och använda relevanta resultat för bedömningar av den inverkan som förändringar i strandlinje vid Forsmark skulle ha på Kärnbränsleförvaret och på SFR, både i kortare (fram till år 2100) och längre tidsperspektiv (flera tiotusentals år).

19.5 Permafrost

Tillväxt och avsmältning av permafrost är den viktigaste klimatrelaterade processen för ett slutförvar inom det periglaciala klimattillståndet, oavsett avfall och förvarskoncept. Periglacialt klimattillstånd råder under cirka en tredjedel av den senaste glaciala cykeln i SKB:s rekonstruktion av Weichsel (SKB 2010w). Förekomst av permafrost påverkar kraftigt grundvattnets flödesmönster. Även grundvattnets sammansättning kan påverkas genom saltutfrysning.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SSM såg vid sin granskning av Fud-program 2010 positivt på att SKB hade gjort fortsatta platsspecifika studier om permafrosttillväxt och dess inverkan på hydrologiska och geokemiska förändringar. Dessa studier var ännu ej publicerade och SSM kunde därför inte bedöma om myndighetens alla synpunkter på Fud-program 2007 adresserats i dessa studier och om ytterligare insatser kunde vara påkallade. Likaså var det svårt för SSM att bedöma om en ökad förståelse av paleotemperaturen i Forsmark var påkallad, eftersom den genomförda studiens resultat (Sundberg et al. 2009) behövdes i sammanhanget där de användes. SSM ansåg det vara angeläget att SKB tillvaratog kunskaperna från GAP för studier av permafrostens betydelse för hydrogeokemi och hydrologi.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2010

Resultaten från de detaljerade studierna av permafrosttillväxt i Forsmarksområdet som beskrevs i Fud-program 2010, utförda inom ramen för SR-Site, har avslutats och gjorts tillgängliga (Hartikainen et al. 2010, SKB 2010f, avsnitt 3.4 och 5.5, SKB 2010m). Studierna genomfördes i en 2D-modell längs en 15 kilometer lång och 10 kilometer djup profil som löper i den regionala topografins gradient, genom det planerade Kärnbränsleförvaret och genom SFR. Detaljerade data från platsundersökningsprogrammet, till exempel på yttopografi, jordtäcket mäktighet och sammansättning, topografiskt fuktighetsindex (inklusive vegetationstyp), strandlinjeförskjutning och framtida sjöutveckling, bergdomäner och sprickzoners lägen och termiska, samt kemiska och hydrauliska egenskaper, användes som indata till simuleringarna. Syftet med studien var att ge en realistisk bild av hur permafrost växer till i Forsmarksområdet och i vilken mån den påverkar förvarets funktion. Resultaten har i SR-Site bidragit till att sätta upp förhållanden avseende permafrost i hydrogeologiska studier av grundvattenflöde (Vidstrand et al. 2010a, b) och markvattenflöde (Bosson et al. 2010) under periglaciala förhållanden. I anslutning till detta studerades även effekten av närvaro av potentiella framtida talikar (ofrusna områden i mark med permafrost) i Forsmarksområdet (Bosson et al. 2010, Hartikainen et al. 2010).

Resultaten från permafrostsimuleringarna som gjordes inom ramen för SR-Site visar att saltutfrysning vid bildning av permafrost enbart förekommer i ringa grad i Forsmark, se SKB (2010w, avsnitt 5.5.3) samt Hartikainen et al. (2010, avsnitt 5.1 och kapitel 5). Om en mycket kraftig sänkning av lufttemperaturen antas, kan processen påvisas mer tydligt men är fortfarande inte omfattande. Anledningen till att utfrysning av salt inte är en betydelsefull process är att grundvattnet i de övre delarna av berget har en låg salinitet. Ingen omfattande påverkan på grundvattnets kemiska sammansättning förväntas därför under framtida perioder med periglacialt klimat och permafrost i Forsmark.

Resultaten från permafroststudien (Hartikainen et al. 2010, SKB 2010w) demonstrerade hur den platsspecifika utvecklingen går till när permafrost bildas och smälter av i Forsmarksområdet, givet den lokala topografien och markytans, bergets och grundvattnets lokala egenskaper. Resultaten visade vidare att det är de rådande förhållandena vid markytan (temperatur, vegetation och snötäcke), som är de huvudsakliga styrande parametrarna för permafrostens rumsliga och tidsmässiga utbredning i Forsmark, medan bergets och grundvattnets egenskaper är av sekundär vikt.

Förutom simuleringar med konstant lufttemperatur analyserades även SKB:s referensutveckling samt kompletterande klimatfall som var mer gynnsamma för permafrosttillväxt. Omfattande känslighetsstudier på indata genomfördes med permafrostmodellen, inklusive på den temperaturkurva som används för dessa tidstransienta simuleringar. Det breda spektrat av simuleringar, inklusive känslighetsstudierna, visar i detalj hur osäkerheten i indata ser ut och dess konsekvens för resultaten (Hartikainen et al. 2010, SKB 2010w). Resultaten från permafrostsimuleringarna användes i SR-Sites säkerhetsanalysscenario för buffertfrysning. Huvudslutsatsen var att frysning av bufferten runt kapslarna kan uteslutas med god marginal, även om alla osäkerheter i permafrostsimuleringarna sätts i läget mest gynnsamt för permafrosttillväxt och adderas till varandra (SKB 2011e).

I de klimatfall där permafrost förekommer inom den period där påtaglig restvärme från Kärnbränsleförvaret värmer upp berggrunden, det vill säga under de första tiotusentals åren, resulterar denna värme i permafrostdjup som är flera tiotal meter grundare än i de fall där ingen värme från kapslarna förekommer (Hartikainen et al. 2010). Allteftersom värmen sedan gradvis avtar så avtar även denna effekt, och permafrosten når djupare. Ingen sådan effekt finns för SFR.

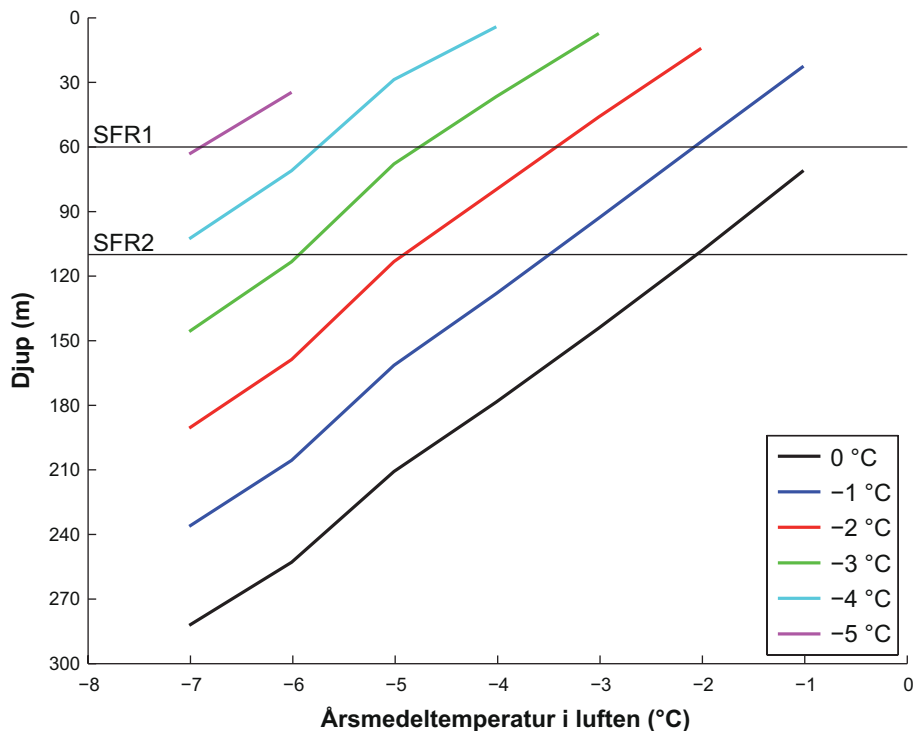
Även om ämnesområdet permafrost inte ingår som ett dedikerat delprojekt i GAP, så är GAP:s forskningsprogram upplagt så att projektet bidrar med viktig information även inom detta område, se avsnitt 19.7. I regionen där GAP genomförs finns i dag omfattande permafrost i berggrunden framför inlandsisen. Observationer av till exempel salinitet i grundvattnet under permafrosten exemplifierar hur en geokemisk sammansättning av grundvattnet kan se ut i kristallin berggrund under periglaciala förhållanden med en inlandsis i närheten.

Flera av angreppssätten och metoderna som används inom klimatprogrammet för säkerhetsanalysen av Kärnbränsleförvaret är användbara också för säkerhetsanalyser av utbyggnaden av SFR. Det finns dock, som nämnts ovan, i det här sammanhanget viktiga skillnader mellan de två förvaren: SFR ligger betydligt grundare och halveringstiderna för de radionuklider som ger dos är kortare. Inom ramen för säkerhetsanalysen SR-PSU utreds hur detta påverkar urval och beskrivning av de klimatutvecklingar som är relevanta för analysen av den långsiktiga säkerheten hos SFR, se Näslund et al. (2013).

I tillägg till de permafrostsimuleringar som genomfördes för Kärnbränsleförvaret i SR-Site, som även inkluderade platsen för SFR, har permafrostsimuleringar anpassade till de speciella förutsättningarna och frågeställningarna som gäller för SFR genomförts inom ramen för säkerhetsanalysen SR-PSU. Studien, *The potential for cold climate conditions and permafrost in Forsmark in the next 60,000 years*, syftade till att analysera möjligheten för permafrost i Forsmark under de kommande 60 000 åren med utgångspunkt från kända variationer i solinstrålning och en spännvidd av möjliga atmosfäriska koldioxidkoncentrationer. Speciellt fokus låg på frågeställningen om klimatet i Forsmark skulle kunna bli tillräckligt kallt för att ge permafrost under perioder med låg solinstrålning, vilket inträffar om cirka 17 000 och 54 000 år. Det framtida klimatet simulerades för dessa perioder dels med en förenklad klimatmodell (Loveclim) (Driesschaert et al. 2007) och dels med en state-of-the-art-klimatmodell (CCSM4) (Gent et al. 2011). För att ge underlag till analysen av möjligheten för permafrost i Forsmark gjordes både jämviktssimuleringar, där drivningsvillkor (såsom atmosfäriska växthusgaskoncentrationer och inkommande solstrålning) hölls konstanta i tiden, och transienta simuleringar, där den rumsliga och säsongsmässiga fördelningen av inkommande solstrålning varierade i tiden såsom förväntas utifrån framtida variationer i de astronomiska parametrarna.

Jämviktssimuleringarna genomfördes för tiden 17 000 år respektive 54 000 år efter i dag, med atmosfäriska koldioxidkoncentrationer i spannet 180 till 400 ppmv (andel per miljon, räknat i volym). Den simulerade temperaturen i Forsmark från den simulering som gav det kallaste klimatet i Forsmark användes sedan som drivningsvillkor för samma permafrostmodell som användes för SR-Site (Hartikainen et al. 2010, SKB 2010w). Med utgångspunkt från känslighetsstudierna som gjordes i Hartikainen et al. (2010) antogs i permafrostsimuleringarna ett torrt klimat och en torr markyta ovan SFR, eftersom dessa förhållanden ger den mest gynnsamma förutsättningen för permafrosttillväxt. Vidare gjordes ett antal nya känslighetsexperiment med permafrostmodellen där lufttemperaturen sänktes jämfört med den som simulerats med klimatmodellen. Resultatet från klimatsimuleringarna visar, som väntat, att klimatet kan bli kallare under de framtida perioderna omkring 17 000 och 54 000 år efter i dag. Slutsatserna av studien baserades på en jämförelse av de aktuella resultaten med andra studier av framtida klimat där en utvärdering av osäkerheterna i resultaten var central. Samtliga osäkerheter i det simulerade klimatet antogs påverka resultaten mot ett maximalt kallt klimat.

När man inkluderar osäkerheterna i metodik och i nuvarande kunskapsläge om framtida klimatutveckling, så är studiens slutsatser att permafrost skulle kunna bildas i området kring SFR både om 17 000 och 54 000 år, under förutsättning att den atmosfäriska koldioxidkoncentrationen har minskat till relativt låga nivåer. Detta betyder dock inte per automatik att även SFR:s förvarsstrukturer fryser, eftersom till exempel betong har en lägre frystemperatur än vatten. Resultaten kommer att användas i säkerhetsanalysen SR-PSU, tillsammans med annan information, för analys av när frysning tidigast skulle kunna ske av betongstrukturerna i SFR. Exempel på resultat från permafrostsimuleringarna ses i figur 19-4.



Figur 19-4. Exempel på resultat från permafrostsimuleringar utförda inom ramen för SR-PSU. Figuren visar simulerat djup för isotermerna 0, -1, -2, -3, -4 och -5 °C vid SFR för olika årsmedeltemperaturer i luften. Djupet för 0 °C-isotermer motsvarar permafrostdjupet, medan -3 °C-isotermer motsvarar frysdjupet för betongstrukturer i SFR om fryskriteriet i säkerhetsanalysen sätts till -3 °C. Förforsdjupet för det existerande SFR (SFR1), cirka 60 meter, och för den planerade utbyggnaden (SFR2), cirka 110 meter, visas med svarta linjer.

Program

Inom ramen för SR-PSU genomförs studier anpassade till de speciella förutsättningar och frågeställningar som gäller för SFR. En huvudfråga här är hur tidigt permafrost, och associerad frysning av SFR, skulle kunna förekomma i Forsmark i framtiden. Denna och kopplade frågeställningar undersöks genom modellering av framtida klimat, modellering av permafrost samt med hjälp av paleoklimatologiska studier av hur klimatet varierat under utvalda delar av Weichsel.

Den numeriska permafrostmodell som användes i säkerhetsanalyserna SR-Site (Hartikainen et al. 2010, SKB 2010w) och SR-PSU (Brandefelt et al. 2013) planeras att ytterligare utvärderas genom att modellen tillämpas på studieområdet för projektet GAP på västra Grönland. Vid denna plats förekommer permafrost framför inlandsisens front ner till ett djup av 300–350 meter, se avsnitt 19.7. I denna studie planeras samma 2D-versioner av modellen att användas som användes i respektive säkerhetsanalys. Även simuleringar i 3D planeras att genomföras i denna studie. I tillägg till att resultaten kan användas för utvärdering av permafrostmodellen, kommer de även att bidra till förståelsen kring utvecklingen av permafrost och talikar inom studieområdet för GAP och deras betydelse för hydrologi och grundvattensammansättning.

Olika försvarskoncept, med olika typer av barriärer, är olika känsliga för degradering genom frysning. Till exempel påverkas betongbarriärer av kraftigare fysisk degradering än bentonitbarriärer, om dessa skulle frysa. Dessutom ger olika förforsdjup olika förutsättningar för frysning. Inom ramen för den planerade säkerhetsbedömningen för förvaret SFL kan insatser rörande koppling mellan potentiell frysning av försvarsstrukturer och val av försvarskoncept och försvarsplats därför komma att genomföras.

Osäkerheten i den temperaturkurva som användes för bland annat simuleringar av permafrost i SR-Site analyserades och beskrevs i detalj inom denna säkerhetsanalys (SKB 2010w, Appendix 1). Effekten av denna osäkerhet inkluderades och analyserades i permafrostsimuleringarna (Hartikainen et al. 2010, SKB 2010w) och analysen av buffertfrysning (SKB 2011e, avsnitt 12.3). För en ökad förståelse av de paleotemperaturer som rått vid Forsmark och för att ytterligare belysa osäkerheten

i temperaturkurvan som användes i SR-Site, vilken är en rekonstruktion av den senaste glaciala cykeln inklusive Weichselglaciationen, planeras en studie där historisk klimatinformation extraheras från borrhålsdata för temperatur och termiska parametrar hos berget från Forsmark, Laxemar och Vättern, se även avsnitt 19.6. Den planerade studien är en fortsättning på den studie som presenterades i Sundberg et al. (2009). Eventuellt kommer även en lokal vid Åre i Jämtland att inkluderas i studien, i samarbete med borrhoprojektet The Collisional Orogeny in the Scandinavian Caledonides (COSC), vilket utgör en del av Swedish Deep Drilling Program (SDDP). COSC planeras att utföras i samarbete med International Continental Scientific Drilling Program (ICDP). I det fall projektet COSC realiseras planerar SKB att delta i delen Geothermal measurements in deep boreholes as input of understanding of past climate evolution.

19.6 Klimat och klimatvariationer

I tillägg till studierna av klimatrelaterade processer såsom inlandsis, permafrost och strandlinjeförskjutning, beskrivna ovan, innehåller klimatprogrammet även studier av klimatet i sig. Syftet är dels att ge fylligare information och exempel på hur klimatet kan te sig inom och vid övergångarna mellan de olika klimattillstånden, dels att ge bättre underlag för konstruktionen av klimatscenarier som beskriver tänkbara framtida klimatutvecklingar. För detta ändamål använder sig SKB både av naturliga klimatarkiv och av klimatmodeller.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Sveriges geologiska undersökning, SGU, konstaterade att de resultat som erhållits vid undersökningarna i Sokli i Finland var intressanta och att det var positivt att SKB planerade att fortsätta undersökningarna. De nya resultaten om klimatförhållandena under MIS 3 var dock vid en jämförelse med förhållandena på kontinenten för samma tid något motsägelsefulla och man bör utvärdera hur säkra dateringarna av sedimenten är och det är även viktigt att man fortsätter undersökningarna i Sokli.

SSM noterade att SKB fullföljt planerna i Fud-program 2007 och såg liksom Sverige geologiska undersökning positivt på att SKB fortsätter med studier som tillvaratar informationen från sedimentkärnan från Sokli. Även SSM ansåg att SKB borde utreda de frågor som uppstår vid en jämförelse med förhållandena på kontinenten under MIS 3, se avsnitt 19.2.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Den paleoklimatologiska studien av sedimentkärnor från Sokli, vilken beskrevs i Fud-program 2010, har fortgått. Lokalen där sedimenten hämtats är unik för Skandinavien i och med att de äldsta sedimenten är omkring 130 000 år gamla och att kontinuerlig sedimentation förekommit på platsen under mycket långa perioder fram till i dag. En omfattande rekonstruktion av förhållandena på platsen för omkring 50 000 år sedan (MIS 3) har genomförts, baserad på en analys av ett stort antal olika proxydata, se Fud-program 2010. Resultaten har, tillsammans med andra studier, reviderat den klassiska bilden av den glaciala historien under mittersta delen av Weichsel. Studien har även visat att klimatet under vissa delar av senaste istidens mitt var mycket varmt, med sommarmedeltemperaturer lika varma som i dag.

Sedan 2010 har studien utökats till att omfatta motsvarande analyser för två interstadiala perioder under tidig Weichsel (MIS 5e och 5c) samt för delar av interglacialen Eem, det vill säga värmeperioden före initieringen av Weichselistiden (Climate dynamics during the Eemian Interglacial (MIS 5e) in the North Atlantic region inferred from a unique sediment sequence at Sokli). För att ytterligare verifiera att metodiken som användes för att kvantifiera klimatvariationer fungerar, genomförs även motsvarande studier på den Holocena sekvensen av sedimentkärnorna från Sokli (Weichselian – Holocene climate variability and environmental change in Scandinavia based on the Sokli sediment sequence). Studien utförs i huvudsak vid Stockholms universitet. Två pågående doktorandprojekt är kopplade till studien, se avsnitt Program nedan.

Två litteraturstudier har, inom ramen för SR-PSU, genomförts för att belysa hur förhållanden och klimat kan ändras vid övergången från ett varmt interglacialt klimat, som den nuvarande värmeperioden, till kalla glaciala förhållanden. Den ena beskriver övergången från perioden Eem till istiden Weichsel, inklusive de kraftiga variationerna i klimat och nedisning som skedde under

tidiga och mittersta delen av Weichsel. Studien bidrar även med en av SSM efterfrågad jämförelse och utvärdering av klimatet såsom det tolkats vid Sokli, med information för motsvarande perioder från andra lokaler på europeiska kontinenten. I den studien jämförs Sokli med information från lokalerna La Grande Pile i Frankrike, Oerel i Tyskland, Horoszki Duże i Polen och Lake Yamozero i nordvästra Ryssland.

Jämförelser görs även med andra terrestra klimatarkiv från centrala och norra Europa, samt med marina arkiv från Nordatlanten och med iskärnedata från den grönländska inlandsisen. Studien bidrar med en uppdaterad genomgång av förhållanden och klimatutveckling för den senaste interglaciala-glaciala cykeln i det tempererade och boreala Europa. Resultaten visar att miljön och klimatet under tidig Weichsel (MIS 5) var distinkt annorlunda än under mittersta och senare delen av Weichsel (MIS 4–MIS 2). MIS 5 karakteriserades av tre intervall med skogsvegetation, både i tempererade och boreala Europa. Dessa perioder var omkring 10 000 år långa och motsvarar ungefär MIS 5e, 5c och 5a. Dessa varma perioder avbröts av två kortare kalla och torra perioder (MIS 5d och 5b), med nedisning i Fennoskandiska fjällkedjan. Överlagrat på dessa långskaliga klimatvariationer under tidig Weichsel finns kortare klimatfluktuationer (tusenårscyklicitet). I kontrast till den tidiga delen av Weichsel dominerades mittersta delen (MIS 4–MIS 2) i stället av öppen vegetation. Under de två perioderna med stor inlandsisutbredning över norra Europa (MIS 4 och 2) rådde kontinentalt klimat med mycket torra förhållanden i Östeuropa. Varma förhållanden med sommartemperaturer nära dagens nåddes under åtskilliga perioder under den relativt fuktiga perioden MIS 3.

Den andra litteraturstudien som har genomförts inom ramen för SR-PSU för att belysa hur klimatet och förhållanden skiftar vid en övergång från varma interglaciala förhållanden till istidsförhållanden beskriver även den övergången från Eem till Weichsel (MIS 5d-a, för perioden 122 000 till 70 000 år sedan), se Wohlfarth (2013). Studien sammanfattar historisk klimatinformation från terrestra, marina och glaciala arkiv för att beskriva och diskutera magnitud, varaktighet och cyklicitet hos klimatförändringarna som utgör den mycket variabla övergången från varmt interstadialt till kallt istidsklimat. Studien diskuterar även de mekanismer som orsakar övergången till ett glacialt klimat vid övergången från Eem till Weichsel, baserat på information från iskärnor och marina och terrestra klimatarkiv.

Studierna vid Sokli, och litteraturgenomgångarna för ett stort antal andra terrestra, marina och glaciala klimatarkiv, bidrar med viktig paleoklimatologisk information som gör att vi bättre kan förstå inom vilka gränser klimatet naturligt kan variera under en glacial cykel. Resultaten är viktiga eftersom de även visar hur klimat och miljö ändras vid övergången från varma interglaciala klimat till kallare istidlika klimat, samt att klimatet haft en mycket stor tidsmässig och amplitudmässig variabilitet under Weichsel, större än vad som tidigare antagits vara fallet.

I tillägg till de omfattande publikationerna från Sokli-studien som rapporterades i Fud-program 2010, har resultat från studierna vid Sokli under de senaste tre åren publicerats i följande vetenskapliga artiklar: Helmens och Engels (2010), Engels et al. (2010), Van Meerbeeck et al. (2011), Helmens et al. (2012), Salonen et al. (2013), Shala et al. (2013). Studien har under denna period även presenterats vid ett stort antal vetenskapliga konferenser.

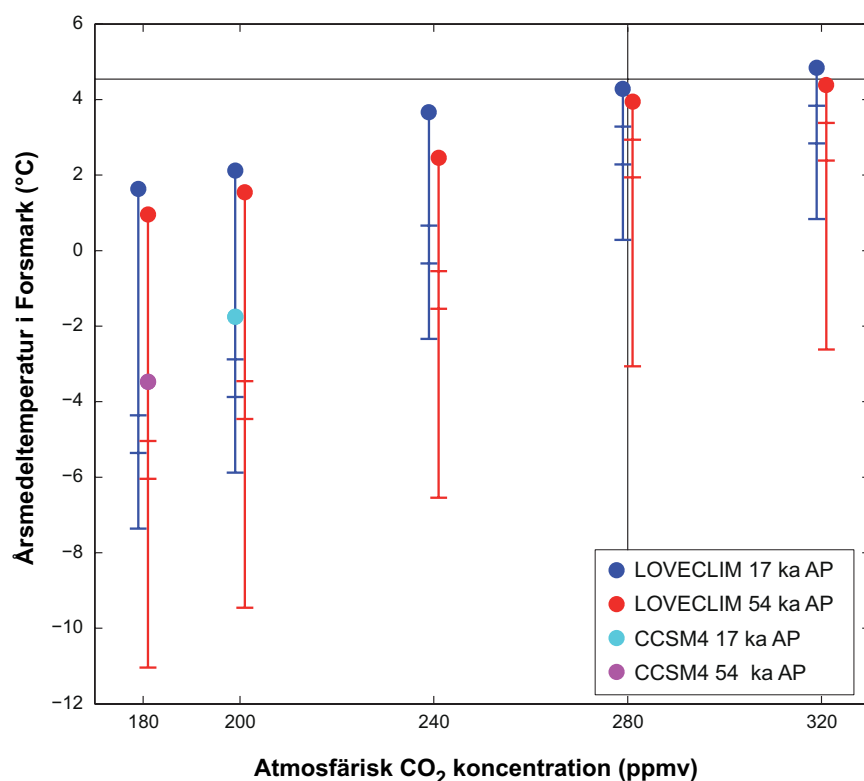
Information från klimatmodeller

Ytterligare resultat från den tidigare rapporterade studien av tänkbara klimat i ett 100 000-års-perspektiv (Kjellström et al. 2009, Brandefelt och Otto-Bliesner 2009, Fud-program 2010), har publicerats som vetenskapliga artiklar (Strandberg et al. 2010, Brandefelt et al. 2011). För att analysera potentialen för framtida kallt klimat utan inlandsis vid Forsmark, och eventuell resulterande permafrostbildning, har simuleringar med klimatmodeller genomförts för de kommande 60 000 åren (Brandefelt et al. 2013), se även avsnitt 19.4 ovan. Studien utförs inom ramen för SR-PSU och syftar till att analysera den tidigaste tidpunkt vid vilken permafrost kan komma att bildas vid Forsmark och i förlängningen om de temperaturer som då råder i berget kan göra att betongbarriärerna i SFR fryser.

Den lägsta solinstrålningen under de kommande 100 000 åren förekommer om 54 000 år (se till exempel Berger och Loutre 2002). Därför omfattar studien enbart de närmaste 60 000 åren och inte säkerhetsanalysen SR-PSU:s totala analysperiod på omkring 100 000 år. Den förenklade klimatmodellen Loveclim (Driesschaert et al. 2007) användes för att studera betydelsen av den framtida variationen i solinstrålning och atmosfärisk koldioxid. Vidare gjordes två simuleringar med state-of-the-art-klimatmodellen CCSM4 (Gent et al. 2011) för att exemplifiera osäkerheten i resultaten

kopplade till skillnader mellan olika klimatmodeller. För att ge underlag till analysen av möjligheten för permafrost i Forsmark gjordes både jämviktssimuleringar där drivningsvillkor (såsom atmosfäriska växthusgaskoncentrationer och inkommande solstrålning) hölls konstanta i tiden och transienta simuleringar där inkommande solstrålning varierade i tiden såsom förväntas med utgångspunkt från kända framtida variationer i de astronomiska parametrarna. Jämviktssimuleringarna genomfördes för perioderna 17 000 och 54 000 år efter i dag och med atmosfäriska koldioxidkoncentrationer i spannet 180 till 400 ppmv.

Figur 19-5 exemplifierar årsmedeltemperaturen i luften två meter ovanför markytan i Forsmarksområdet i dessa simuleringar. Resultaten visar som förväntat, att solinstrålning och koldioxid har en markant påverkan på den framtida lufttemperaturen. Resultaten visar vidare, i överensstämmelse med andra studier i den vetenskapliga litteraturen, att skillnaden mellan de två klimatmodellerna är signifikant. Osäkerheten i den simulerade årsmedeltemperaturen, till följd av skillnader mellan olika klimatmodeller, osäkerhet i atmosfärisk koncentration av andra växthusgaser än koldioxid, samt osäkerhet i framtida utveckling av glaciärer och inlandsisar uppskattades med utgångspunkt från den vetenskapliga litteraturen. Eftersom huvudsyftet med studien var att se om permafrost skulle kunna bildas vid Forsmark, antogs samtliga osäkerheter i det simulerade klimatet påverka resultaten mot ett maximalt kallt klimat.



Figur 19-5. Exempel på resultat från klimatsimuleringar gjorda för säkerhetsanalysen SR-PSU. Resultaten är från en studie där möjligheten för ett kallt klimat och permafrosttillväxt i centrala Sverige analyseras i relation till framtida variationer i solinstrålning och atmosfärens koldioxidkoncentration (Brandefelt et al. 2013). Figuren visar årsmedeltemperatur i luften i Forsmark i simuleringar av framtida perioder med låg solinstrålning under sommaren (17 000 och 54 000 år efter i dag). Som referens visas även den observerade årsmedeltemperaturen (+4,5 °C) och den förindustriella atmosfäriska koldioxidkoncentrationen (280 ppmv) under perioden 1751–1850 med svarta linjer. Osäkerheten i den simulerade temperaturen visas i figuren (blå och röda vertikala linjer) under antagandet att alla osäkerheter samverkar för att ge en kallare temperatur i Forsmark än den som simulerats med Loveclim. Osäkerhet på grund av skillnader mellan olika klimatmodeller (övre delen av linjen), osäkerhet i atmosfärisk koncentration av andra växthusgaser än koldioxid (mellersta delen av linjen) samt osäkerhet i framtida utbredning av glaciärer och inlandsisar (nedre delen av linjen) redovisas separat.

Resultat från klimatsimuleringarna användes, tillsammans med den uppskattade maximala osäkerheten i dessa resultat, som indata till platsspecifika simuleringar av permafrost, för att studera om klimatet under de framtida perioderna med låg solinstrålning skulle kunna generera permafrost i Forsmark, se avsnitt 19.5.

Den påverkan som global uppvärmning kan komma att ha på grundvattenkemin hanteras inom respektive säkerhetsanalys för Kärnbränsleförvaret, SFR och SFL.

Studierna av geologiska klimatarkiv liksom användandet av olika klimatmodeller har bidragit med väsentlig information till beskrivningen av möjlig förändring och variabilitet hos klimatet, vilket utgör en viktig del i SKB:s säkerhetsanalyser. Studierna har bland annat ökat förståelsen för de mer extrema klimatutvecklingarna som analyseras, samt bidragit till att undersöka realismen i dessa klimatfall.

Program

SKB har tidigare studerat klimatet under specifika typer av klimattillstånd, där dessa beskrivits i detalj för Forsmark till exempel med hjälp av klimatsimuleringar av perioder med periglacialt, glacialt och tempererat klimat med global uppvärmning (Kjellström et al. 2009). Dessa simuleringar gjordes med konstanta drivnings- och randvillkor. SKB planerar att starta en kompletterande studie som syftar till att i detalj studera *övergångar* mellan olika klimattillstånd, både genom geologiska arkiv och genom klimatmodellering. Studien kommer att analysera perioden från senaste glaciala maximum, för cirka 21 000 år sedan, genom deglaciationen, till en tidpunkt när värmeperioden Holocen är etablerad för 10 000 år sedan. Perioden spänner från fulla glaciala förhållanden, via ett varmare klimat, med kalla bakslag till exempel under Yngre Dryas, till tempererade förhållanden under Holocen. Detta är, till skillnad från till exempel MIS 3, en period där mycket information finns tillgänglig. Denna studie av övergångar mellan klimattillstånd har redan påbörjats genom en doktorandstudie vid Stockholms universitet, *Quantifying Rapid Climate Transition 20–10 ka BP Using Paleo Proxies*. Doktorandstudien löper till 2016. Huvuddelen av studien av klimatövergångar, inklusive litteraturstudier och klimatmodellering, planeras att starta under 2013. Studien planeras bli ett samarbete mellan KTH, Stockholms universitet (Institutionen för geologi och Institutionen för naturgeografi och kvartärgeologi) och SMHI (Rossby Centre).

SKB planerar även en fortsättningsstudie till arbetet redovisat i Sundberg et al. (2009) där borrhåls-temperaturer från Forsmark och Laxemar analyserades med avseende på bland annat historisk klimatinformation. Den fortsatta studien kommer att göra analysen mer i detalj, samt inkludera data från ett två kilometer djupt borrhål under Vättern. Temperaturloggning av detta borrhål genomfördes under oktober 2012. Eventuellt kommer även ett framtida borrhål i Åreområdet att inkluderas i studien, i samarbete med projektet COSC, se även avsnitt 19.5. Analyserna förväntas ge kvantitativ historisk klimatinformation (temperatur) på olika tidsskalor. Resultaten planeras att bland annat användas för ytterligare utvärdering av osäkerheten av den paleotemperaturkurva för Weichselperioden som SKB använt för bland annat modellering av permafrost för säkerhetsanalysen SR-Site.

De pågående studierna av klimatet under tidig Weichsel från sedimentkärnorna från Sokli kommer att fortsätta och avslutas under kommande Fud-period. Som en del av studien av sedimentkärnorna från Sokli bedriver SKB två doktorandprojekt, vilka kommer att fortgå under perioden. Det första doktorandprojektet (*Holocene climate variability and environmental change in Scandinavia based on the Sokli sedimentary sequence*) har huvudsyftet att undersöka klimatvariationer under Holocen med samma metodik som tidigare använts för den tidiga och mittersta delen av Weichsel (perioderna MIS 3, MIS 5c och MIS 5e). Studien genomförs dels för att utvärdera metoden, dels för att erhålla ny klimatinformation som stöd för de klimatscenarier som används i SKB:s säkerhetsanalyser. Studien görs vid Institutionen för naturgeografi och kvartärgeologi vid Stockholms universitet och planeras pågå till slutet av 2013. Det andra doktorandprojektet studerar klimatet under den föregående interglacialen, Eem (*Climate dynamics during the Eemian Interglacial (MIS 5e) in the North Atlantic region inferred from a unique sediment sequence at Sokli*). Planerad tidpunkt för disputation är slutet av 2015.

19.7 Greenland Analogue Project

För att öka förståelsen för hur klimatförändringar, och särskilt glaciationer, kan komma att påverka ett slutförvar på lång sikt har SKB tillsammans med Posiva i Finland och Nuclear Waste Management Organization (NWMO) i Kanada initierat ett projekt på västra Grönland, the Greenland Analogue Project (GAP), där en modern istidsanalogi studeras. De förväntade resultaten är av stor vikt för säkerhetsanalyser av såväl Kärnbränsleförvaret som SFR och SFL.

Fältundersökningarna i projektet utförs på västra Grönland i ett område öster om orten Kangerlussuaq. Bergarterna i området uppvisar stora likheter med bergarterna i Forsmark. Likheten är en förutsättning för att studierna ska vara meningsfulla och ge önskad information om hydrologi, hydrokemi och permafrost i anslutning till en inlandsis.

Följande processer och övergripande frågeställningar studeras inom ramen för GAP:

- Hur djupt ned i berggrunden kan glacialt smältvatten tränga ner?
- Vilken kemisk sammansättning har smältvattnet om och när det når slutförvarsdjup (cirka 500 meter)?
- Var under inlandsisen genereras smältvatten och grundvatten?
- Hur stor del av det syresatta glaciala smältvattnet når förvarsdjup?
- Hur ser trycksituationen ut under inlandsisen?
- Fungerar den talik som studeras i området som utsläppspunkt för djupt grundvatten?

Genom att använda den grönländska inlandsisen som en analogi för en framtida situation vid Forsmark med glacialt klimattillstånd, görs observationer som krävs för en integrerad och ökad konceptuell förståelse för hydrologiska och hydrogeokemiska processer vid glaciation. Målet med GAP är att ge en ökad processförståelse för att bättre kunna skapa konceptuella och numeriska modeller av grundvattenflöde, grundvattenkemi och de hydromekaniska kopplingarna under glaciala perioder. Ett mål är att kunskap från projektet ska kunna användas till att bättre bedöma graden av pessimism i de antaganden som görs i dagens hydrogeologiska simuleringar, samt om möjligt minska graden av osäkerhet i dessa.

GAP utgörs av tre delprojekt (A–C) som arbetar mot specifika mål. I delprojekt A studeras indirekt inlandsisens subglaciala hydrologi och grundvattenbildning genom glaciologiska och geofysikaliska undersökningar. Ett nätverk har etablerats av kontinuerliga gps-stationer för att mäta isrörelse och automatiska väderstationer för att ge data till beräkningar av vattenproduktion på ytan. Dessutom sker mätningar via till exempel radar, smältbalansmonitorering och seismiska undersökningar.

Delprojekt B syftar till att göra direkta observationer av subglaciala hydrauliska förhållanden (bland annat rumsliga och temporala variationer i vattentryck) och grundvattenbildning med hjälp av hetvattenborrning genom inlandsisen och tryckgivare som placerats i botten av isen.

I delprojekt C studeras hydrogeokemin och hydrogeologin i området utanför och under isen, med hjälp av bergborrningar och monitoringsprogram. Ett borrhål ned till motsvarande förvarsdjup har borrats och instrumenterats. Även information om permafrosten i området erhålls från delprojekt C.

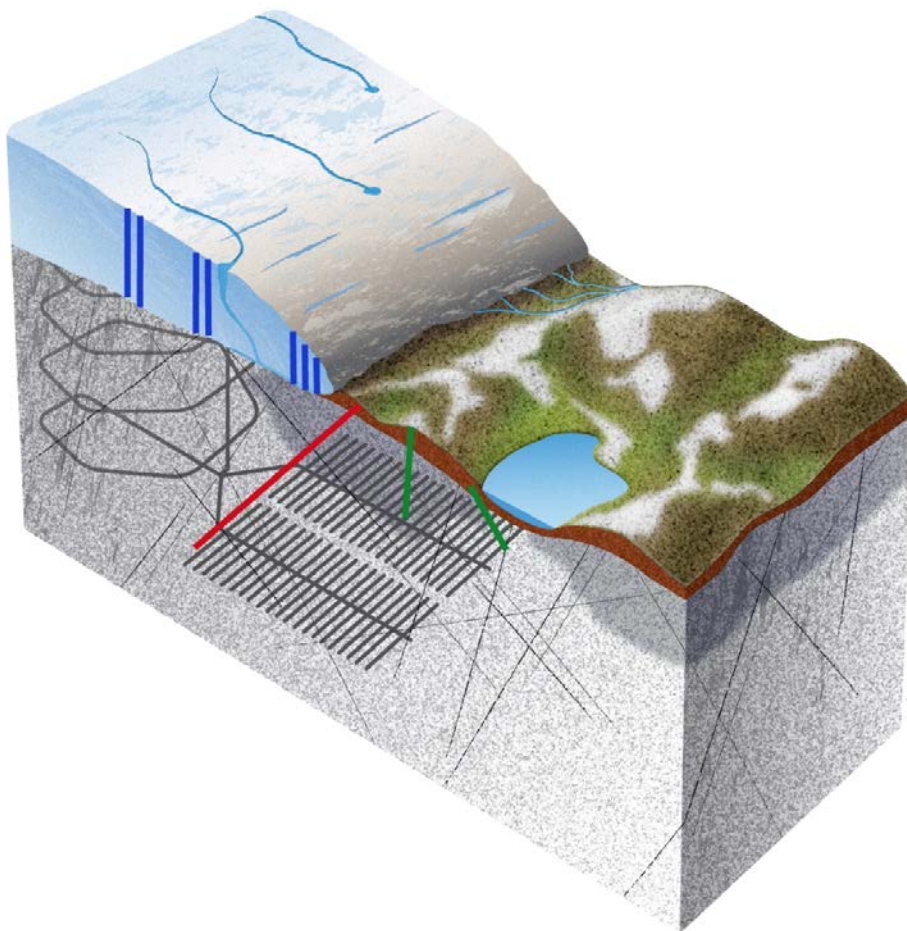
Figur 19-6 är en principskiss som illustrerar i vilka områden de olika delprojekten inom GAP utför undersökningar. Tabell 19-1 listar de olika data som samlas in i GAP. Dessa data används för att skapa en integrerad förståelse av det hydrologiska och hydrogeokemiska systemet och används även i modelleringar av inlandsisar och hydrogeologi som pågår inom, men även parallellt med, GAP.

För planering, effektivisering och för att koppla samman resultaten inom GAP pågår ett kontinuerligt samarbete mellan de tre delprojekten. Genom detta säkerställs även att slutresultaten från projektet utgör en integrerad bild av inlandsishydrologi, hydrogeologi, och geokemi inom studieområdet. Ett flertal ämnesområden inom SKB:s forskningsprogram har direkt eller indirekt nytta av resultaten från GAP:

- 1) Klimat och hydrogeologi: beskrivningen av de hydrogeologiska förhållandena i och omkring en inlandsis (avsnitt 19.2 Inlandsis och glacial hydrologi och 26.4.2 Hydrogeologi i det djupa berget).
- 2) Geokemi: grundvattenkemiska förhållanden vid glaciation/permafrost (avsnitt 26.15 Reaktionen med berget – grundvattenkemi och 26.23 Saltutfrysning).
- 3) Biosfär: biosfärens utveckling i en periglacial miljö (avsnitt 27.7 Effekter av långtidsvariationer).

Tabell 19-1. Data och information som erhålls inom GAP.

Delprojekt	Information/data
A	Isrörelsehastighet (gps), förekomst av fritt vatten vid botten av inlandsisen, isdjup, bottentopografi (mark och flygradar), smältvattenproduktion (meteorologiska data), vattenflödes hastigheter (spårtester), tryck/ utflöde/flödes hastigheter i supraglaciala sjöar, seismiska data, observationer av supraglacial hydrologi (fjärranalysdata)
B	Rumsliga och tidsmässiga variationer i vattentryck under inlandsisen (isborrning), borrhålsbilder (isborrning), isrörelsehastighet (gps), subglacial topografi (lågfrekvent radar), vattenflödes hastigheter (spårtester), meteorologiska data
C	Berggrundsdata, strukturgeologiska data, geokemiska data inklusive isotopdata av berg- och ytgrundvatten, hydrogeologiska data (tryck, temperatur och konduktivitetsdata), mikrobanalyser, temperaturprofiler i borrhål, mineralogiska resultat samt petrofysisk information



Figur 19-6. Principillustration över del av fältundersökningsområdet på Grönland. Skuggade mörkgrå områden motsvarar permafrost. Under den proglaciala sjön finns en talik, det vill säga en ofrusen del i permafrosten. I en talik kan utbyte mellan ytvatten och djupt grundvatten ske. I figuren har ett tänkt slutförvar infogats, i detta fall har layouten för Kärnbränsleförvaret i Forsmark använts. På inlandsisen finns ett nätverk av gps-stationer och automatiska väderstationer för kontinuerlig insamling av data till delprojekt A. Med hjälp av gps- och väderstationsnätverket erhålls information om isrörelsen samt hur mycket isen smälter. De blå vertikala linjerna visar var delprojekt B borrar genom isen. Gröna linjer visar kärnborrhålet som borrhades av delprojekt C för att undersöka en talik i området samt permafrostens mäktighet. Den röda linjen visar projektionen av det djupa borrhålet som borrhades av delprojekt C och som når ner till förvararlikt djup.

Förutom SKB, Posiva och NWMO deltar också följande organisationer och universitet i GAP:

GEUS (Danska och Grönländska geologiska undersökningen)	Terralogica (Sverige)
GTK (Finska geologiska undersökningen)	University of Wyoming (USA)
In2EarthModelling (Schweiz)	University of Montana (USA)
TerraSolve (Sverige)	Aberystwyth University (Storbritannien)
Bergab (Sverige)	Waterloo University (Kanada)
Geosigma (Sverige)	Stockholms universitet (Sverige)
Hydroresearch (Sverige)	Uppsala universitet (Sverige)

Indirekt är även följande universitet med i projektet: Bristol University, Edinburgh University, Cambridge University, Swansea University, University of Washington, Princeton University och University of Indiana.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SSM såg vid sin granskning av Fud-program 2010 positivt på SKB:s Greenland Analogue Project och ansträngningarna att förbättra den konceptuella förståelsen av hydrologi och hydrogeologi under glaciala förhållanden. Myndigheten ansåg det viktigt att resultaten på ett lämpligt sätt tolkas med hänsyn till förhållandena för befintliga och planerade slutförvaranläggningar i Forsmark. Avsnitt 19.2 beskriver en processtudie av inlandsisars hydrologi som fokuserar på direkt överföring av erhållen kunskap från GAP till Fennoskandiska förhållanden.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

Omfattande undersökningar i fältområdet på Grönland har utförts sedan Fud-program 2010. Med hjälp av kärnboringar och högupplösta temperaturprofileringar har kunskap erhållits om permafrostdjupet i området, som visar sig ha en mäktighet på 300–350 meter i de israndnära områdena. Resultaten från temperaturmonitoreringen i borrhålen visar att det finns aktiva talikar framför isen i undersökningsområdet, och geotermisk modellering indikerar att så kallade through taliks (talikar som sträcker sig genom hela permafrosttäckets, i detta fall 300 meter) kan bildas i kristallin berggrund på mindre än 500 år.

Under 2011 kärnborrades ett hål i direkt anslutning till iskanten ner till ett djup av 640 meter. Borrhålet går igenom 350 meter permafrost och slutet av borrhålet befinner sig i berggrunden under inlandsisen. Borrhålet är instrumenterat med ett system som möjliggör vattenprovtagning vid ett djupintervall om 550–580 meter samt kontinuerlig övervakning av tryck, temperatur och elektrisk konduktivitet. Det finns även möjlighet att logga temperaturen längs borrhålet och på så vis erhålla resultat om permafrostdjupet, samt information om vattenflöden i berggrunden. Vattenprovtagning utfördes i tre sektioner i september 2011. Dessa vattenprover innehöll dock som förväntat fortfarande höga halter av spolvatten från borrhålen. De preliminära resultaten tyder på att vattnet på detta djup har en sammansättning motsvarande glacialt smältvatten.

Undersökningar av sprickmineral från borrhålen för att studera redoxfronten i detta område visar att det finns en tydlig förändring i redox där övergången från oxiderande till reducerande förhållanden indikerades mellan 40 och 60 meters djup. Dessa resultat överensstämmer väl med resultat från undersökningar av den aktuella redoxfronten i berget i Laxemar (Drake et al. 2009) och på Äspö (Landström et al. 2001).

Resultat från berggrunds- och sprickkartering samt geokemiska analyser av bergarterna i Kangerlussuaq-området visar att berggrunden till stora delar liknar berggrunden i Forsmark. Ett nätverk av gps-stationer och automatiska väderstationer har placerats på inlandsisen och utifrån dessa stationer har en stor mängd isrörelsedata samt meteorologiska data insamlats. En stor del av isens bottenografi i fältområdet har undersökts med markradar. Radarundersökningarna ger också en indikation på var det råder botten-smältande respektive bottenfrusna förhållanden det vill säga en indirekt indikation på var det kan bildas grundvatten.

Vidare har både aktiva och passiva seismiska undersökningar utförts för att studera det subglaciala materialets sammansättning och egenskaper samt hur vatten transporteras från isens överyta genom isen och ner till botten av isen. Genom att kombinera radardata med resultaten från ytundersökningarna på inlandsisen, och med informationen från de seismiska studierna, fås indirekt information om hur det subglaciala hydrologiska systemet fungerar i området. Det ger även en indikation på vilket material det subglaciala lagret består av och vilken mäktighet det har.

Ett 30-tal hål har borrats med hetvattenborrningsteknik genom inlandsisen i en transekt som sträcker sig från isranden och in cirka 40 kilometer mot inlandsisens mitt. Ishålen har instrumenterats med tryckgivare, töjningsmätare och temperaturgivare. I borrhålen har olika typer av hydrologiska tester utförts, till exempel injektionstester och pumptester. Detta för att studera det basala hydrologiska systemet. I ett antal borrhål har även prover tagits på subglacialt vatten. Preliminära resultat visar att silikatvittring är en dominerande process under inlandsisen i undersökningsområdet. Analyser av den kemiska sammansättningen hos subglacialt vatten visar att det subglaciala dräneringssystemet är effektivt och att det i området kan transportera stora mängder subglacialt vatten fort.

Isborrningarna har utförts i områden motsvarande olika typer av basala förhållanden, och istjockleken där hålen borrats har varierat från 100 till 850 meter. Hål har borrats nära isranden för att studera de basala förhållandena i randområdet. Ett antal hål har borrats vid djupa dalgångar där dräneringen förväntas vara mycket god och ett antal hål har borrats på höjdplatåer där dräneringen inte förväntas vara lika god som i dalgångarna. Alla hål som nått botten av isen har uppvisat bottenmältande förhållanden. Vidare har fältundersökningar visat att isen inte varit bottenfrusen vid isranden. De basala trycken från borrhålen visar att ett subglacialt effektivt dräneringssystem med smältvatten är aktivt från isranden och åtminstone 30 kilometer in mot inlandsisens mitt. Preliminära resultat indikerar vidare att dessa tunnlar och kanaler är trycksatta även under vintertid och alltså inte befinner sig vid atmosfärstryck, vilket antagits i tidigare modeller. De preliminära resultaten visar vidare att de horisontella tryckgradienterna är små förutom vid iskanten och att det basala trycket över tid ligger nära isövertrycket i detta område.

Ismodellering med data från dessa isborrningar och fältundersökningar visar att inte enbart geotermiskt flöde är viktigt för att bilda basalt smältvatten utan att även friktionsvärme från basal glidning och advektionsvärme orsakad av isrörelse är viktiga processer.

Preliminära resultat från de indirekta och direkta observationerna av det subglaciala hydrologiska systemet visar att utseendet och egenskaperna hos systemet kan uppvisa en tydlig rumslig variation. Arbete inom projektet pågår nu för att presentera en konceptuell modell över det basala hydrologiska systemet, baserat på dessa nya och unika observationer från en existerande inlandsis.

Vidare kvarstår att analysera data för att ta reda på hur stor del av bottenlagret som är täckt av vatten, det vill säga hur stor del av det basala lagret som utgör ett potentiellt infiltrationsområde.

Projektworkshoppar har hållits i Åbo, 2011 och i Stockholm, 2012. Fokus var då att diskutera inlandsismodellering, hydrogeologisk modellering, resultaten från fältundersökningsprogrammet, samt den integrerade konceptuella förståelsen av systemet som studerats inom GAP. Resultat från GAP och relaterade studier har publicerats i rapporter, presenterats vid ett antal konferenser och publicerats som artiklar i vetenskapliga tidsskrifter (Aaltonen et al. 2010, Bartholomew et al. 2010, Booth et al. 2012, Brinkerhoff et al. 2011, Engström et al. 2012, Follin et al. 2011, Harper et al. 2011, Jaquet et al. 2010, Johansson et al. 2013, Pöllönen et al. 2012, SKB 2010n, van As et al. 2012).

Program

Rekognoserande observationer genomfördes i fältområdet kring Kangerlussuaq under 2005, varefter GAP initierades 2008 med inledande fältundersökningar. De storskaliga fältundersökningarna inom GAP avslutades under hösten 2012. Projektet är inne i en avrapporteringsfas där resultaten från undersökningarna 2008–2012 nu utvärderas och tolkas. Slutrapporteringen av GAP förväntas vara klar i slutet av 2014. Relevanta resultat från projektet kommer fortlöpande att inkluderas i pågående och kommande säkerhetsanalyser.

Även om de storskaliga fältundersökningarna är avslutade inom GAP planerar SKB att under perioden 2013–2016 upprätthålla monitoreringen i borrhålen, samt nätverken med väder- och gps-stationer. Med hjälp av längre tidsserier och mer data fås en bättre möjlighet att kvantifiera variabiliteten och osäkerheten i resultaten.

20 Kortlivat låg- och medelaktivt avfall

I detta kapitel beskrivs SKB:s naturvetenskapliga forskning rörande egenskaperna hos avfallet i slutförvaret för kortlivat låg- och medelaktivt avfall. Arbetet bedrivs delvis inom säkerhetsanalysen i projekt SFR-utbyggnad, SR-PSU. I den säkerhetsanalys som ingår i ansökan enligt kärntekniklagen om ett utbyggt SFR identifieras ytterligare forskningsbehov.

Den forskning SKB planerar att genomföra för att öka förståelsen för hur funktionen hos de tekniska betongbarriärerna förändras beskrivs i kapitel 22 Betongbarriärer. Den forskning och utveckling som bedrivs av kärnkraftverken rörande avfall som ska deponeras i SFR presenteras i del II Låg- och medelaktivt avfall.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 beskrevs inledande hur SKB:s naturvetenskapliga forskning rörande egenskaperna hos avfall i slutförvar för kortlivat låg- och medelaktivt avfall bedrivs och att den bygger på en processbaserad metodik.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Inom SR-PSU har en rapport tagits fram som behandlar processer relaterade till avfallskollina (det konditionerade och icke-konditionerade avfallet samt dess emballage) vilka har identifierats som relevanta för den långsiktiga säkerheten för SFR. Systematiken för denna processrapport bygger på systematiken som SKB tidigare använt inom säkerhetsanalyserna för använt kärnbränsle (SKB 2006d, e, f). De processer som beskrivs i rapporten bygger på de egenskaper, händelser och processer (FEP – Features, Events and Processes) som har ansetts vara av betydelse för SFR. Denna rapport ingår som underlag till ansökan enligt kärntekniklagen om ett utbyggt SFR.

Program

En av uppgifterna för en säkerhetsanalys är att identifiera och prioritera kvarstående frågeställningar. Slutsatserna i SR-PSU kommer att ha stor inverkan på forskningsprogrammet under den kommande Fud-perioden. Det forskningsbehov som identifieras i dagsläget beskrivs under respektive variabel och process.

20.1 Initialtillstånd i avfallet

Initialtillståndet för SFR definieras som det tillstånd som råder i förvaret vid förslutning. I samband med förslutningen kommer förvarets dränagepumpning att upphöra och förvaret kommer att vattenfyllas.

Avfallets egenskaper vid deponering bestäms av hur avfallsproducenterna konditionerar avfallet och av egenskaperna hos avfallsbehållarna. Detta regleras i sin tur av acceptanskriterier för avfall och typbeskrivningar. Acceptanskriterierna ska ge en samlad bild över de krav som ställs på avfallet för att det ska kunna deponeras i SFR. Egenskaperna hos avfallet vid deponering säkerställs genom den verifiering som beskrivs i avsnitt 4.3.1 Drift av anläggningen.

Avfallets egenskaper vid förslutning beror även på miljön i SFR och eventuell kringgjutning. De drift- och deponeringsrutiner som finns på SFR, exempelvis kringgjutningsrutiner, reglerar därmed avfallets egenskaper vid förslutning.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I sin granskning av Fud-program 2010 kommenterade SSM att det är egenskaperna vid deponerings-tillfället som är av intresse för att kunna styra och kontrollera vad som sedan händer med avfallet i slutförvaret. Avfallet måste av denna anledning uppfylla vissa krav för att kunna deponeras. SKB kommer att behöva ta fram och redovisa sådana krav i form av så kallade acceptanskriterier.

Program

Inom SR-PSU förutsätts vissa egenskaper hos avfallet, vilket medför att motsvarande krav ställs på avfallet. Det görs även en översyn av acceptanskriterierna för avfallet för att säkerställa att de överensstämmer med de egenskaper som förutsatts.

20.1.1 Variabler

Initialtillståndet är startpunkten för analyser av den långsiktiga säkerheten och beskrivs av de initiala värdena hos ett antal variabler, se tabell 20-1. Variablerna karakteriserar avfallskollina på ett lämpligt sätt för säkerhetsanalysen. Beskrivningen gäller inte bara själva avfallet, utan även avfallsbehållarna samt hålrummen som finns i och mellan avfallsbehållarna.

20.1.2 Geometri

SFR innehåller avfall och avfallsbehållare av olika typer med olika geometrier, vilka specificeras i typbeskrivningarna. Mellan avfallsbehållare och mellan barriärer och avfallsbehållare finns hålrum som i vissa fall återfylls. En del typer av avfallskollin innehåller avfall i olika former, till exempel skrot eller olika typer av konditionerad jonbytarmassa. Om ett avfallskolli inte är helt fyllt med avfall, kan det även innehålla utfyllnadsmaterial och hålrum.

För vissa typer av avfall utgör andelen hålrum ett avfallsacceptanskriterium som ska säkerställa att svällande avfall inte utövar ett för stort tryck på barriärerna.

För korroderande material är den totala ytan en viktig parameter samt förhållandet mellan yta och volym.

Tabell 20-1. Variabler för beskrivning av initialtillståndet.

Variabel	Definition	Avsnitt
Geometri	Volym och dimensioner för avfallsbehållare, avfallet, tomrummet i avfallet och tomrummet mellan avfallet och avfallsbehållare. Porositet och porgeometri hos avfallet och avfallsbehållare. Sprickfördelning och sprickgeometri hos avfallet och avfallsbehållare.	20.1.2
Strålningsintensitet	Intensitet av alfa-, beta-, och gammastrålning.	20.1.3
Temperatur	Temperatur i avfallet och avfallsbehållare.	20.1.4
Hydrovariabler	Vattenmättnad, vattentryck, och vattenflöden i avfallsbehållare, avfall, tomrum, porer och sprickor.	20.1.5
Mekaniska spänningar	Mekaniska spänningar i avfall och avfallsbehållare.	20.1.6
Totalt radionuklidinventarium	Total förekomst av radionuklider i avfallets olika delar. Typ, mängder, kemisk och fysikalisk form.	20.1.7
Materialsammansättning	Mängd, sammansättning, kemisk form och yta till volymförhållande hos materialet i avfall och avfallsbehållare.	20.1.8
Vattensammansättning	Sammansättning hos vatten inklusive radionuklider. Eh, pH, jonstyrka, lösta specier, lösta gaser samt koncentrationen av koloider och partiklar i avfallsbehållare, avfall, tomrum, porer och sprickor.	20.1.9
Gasvariabler	Mängder, sammansättning, volym, tryck och flöden.	20.1.10

För porösa material utgör även porositet och porgeometri geometriparametrar. Porositeten hos betongbehållare bestäms initialt av mängden ballast, cementtyp och vattencementtal. Den initiala porositeten hos cementkonditionerat avfall beror på vilket recept som använts.

För vissa avfallsbehållare och avfallstyper är också sprickfördelning och sprickgeometri geometriparametrar. Mängden sprickor och geometrin hos de sprickor som finns initialt i betongbehållare och cementkonditionerat avfall påverkas när volymen ändras vid härdningen samt vid eventuell torkning och återfuktning.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SKB angav i Fud-program 2010 att hålrummens inverkan på hydrovariabler och den långsiktiga säkerheten kommer att utredas samt att återfyllning kommer att studeras med hjälp av förbättrade radionuklidtransportmodeller.

SSM ställde sig tveksam till påståendet att tillförd expansionsvolym i silon skulle vara tillräcklig, eller tillgänglig för att ta upp all volymexpansion i avfallet. En uppdatering av kunskapsläget för denna process var alltså önskvärd enligt SSM.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Modeller som beskriver befintligt SFR och utbyggnaden med en förfinad geometrisk representation av förvarsdelar, barriärer och avfall har utvecklats, se avsnitt 20.1.5 Hydrovariabler.

Beräkningar har genomförts där svällning av bitumen har jämförts med tillgängligt hålrum, se avsnitt 22.2.7 Tryck från svällande avfall.

Program

I dag finns inga frågor identifierade som kräver ytterligare forskningsinsatser. I den säkerhetsanalys som ingår i ansökan enligt kärntekniklagen om ett utbyggt SFR identifieras ytterligare behov av att öka kunskapen om variabelns initialtillstånd.

20.1.3 Strålningsintensitet

Strålningsintensiteten beror på inventariet av radionuklider samt densitet och geometri hos avfall och avfallsbehållare. Avfallet som är deponerat i SFR har initialt låg strålningsintensitet och den avtar därefter. Strålningsintensiteten har bedömts ha störst inverkan på det bitumensolidifierade avfallet med högst aktivitet. Även för detta avfall har strålningsintensitetens inverkan bedömts vara försumbar (Pettersson och Elert 2001).

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SKB ansåg att ytterligare beräkningar kan bli aktuella som resultat av förändrat radionuklidinventarium, till exempel om beslut fattas att förvara reaktortankar i SFR. Om det visar sig att det kan bli aktuellt med slutförvaring av avfall med hög strålningsintensitet från nedmontering och rivning kan ytterligare beräkningar behövas.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Inverkan av strålningsintensiteten på förvarets utveckling från det avfall från nedmontering och rivning som SKB planerar att slutförvara i SFR har bedömts som försumbar. SKB följer utvecklingen inom ämnesområdet.

20.1.4 Temperatur

Den initiala temperaturen i förvaret sätts av det omgivande bergets temperatur. Initialt förekommer inga värmealstrande processer i avfallet. När förvaret vattenmättas ökar korrosionshastigheten, men detta kommer endast att leda till en försumbar temperaturökning. Strålningsintensiteten i det avfall som finns deponerat i SFR är så pass låg, att temperaturförändringar på grund av radioaktivt sönderfall är försumbara. SKB följer fortsättningsvis utvecklingen inom ämnesområdet.

20.1.5 Hydrovariabler

Hydrovariablerna för avfallet omfattar vattenmättnad, vattentryck och vattenflöden i avfallsbehållare, avfall, tomrum, porer och sprickor.

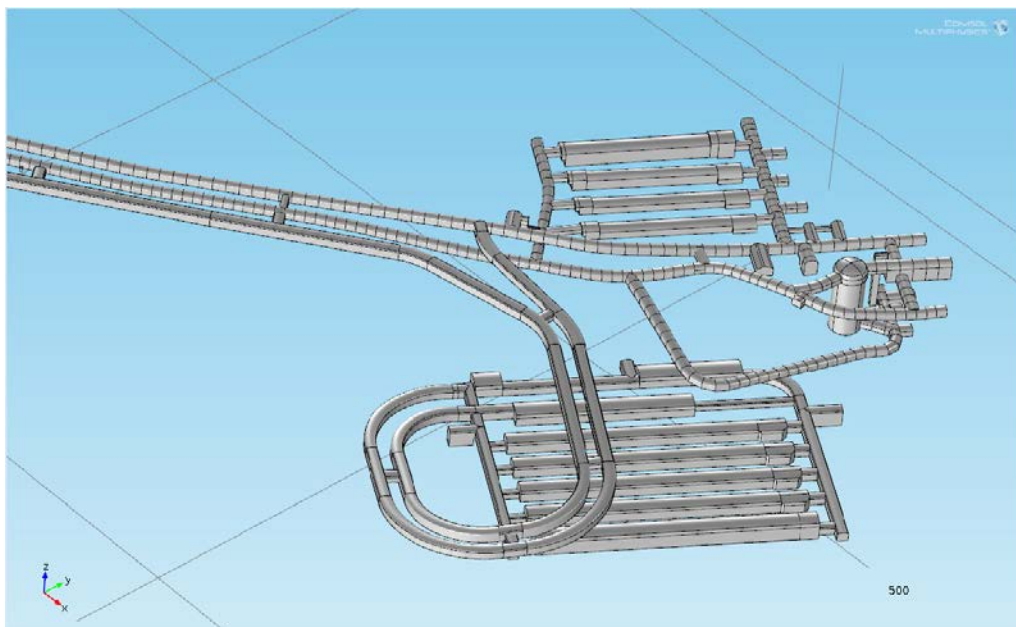
Randvillkoren som styr vattenflödet genom avfallet ges av det omgivande tryckfältet i modellen. Detta fält beror på förvarets layout och placering i berget, bergets hydrogeologiska egenskaper, de tekniska barriärernas egenskaper samt på de yttre randvillkor som gäller för flödesmodellen. Den lokala flödesbilden påverkas vidare av storlek, form och materialegenskaper hos avfallet och dess behållare.

Vattenflöden i avfallet förekommer inte under driftfasen, eftersom förvaret då dränagepumpas. När dränagepumpningen upphör kommer förvaret att vattenfyllas. Vid förslutningen är vattenmättnaden i avfallet initialt låg. Viss mängd vatten kan dock förekomma till följd av inträngning via vattenförande sprickor i berget och vattenhalten i de olika delarna är beroende av kontakten med det omgivande berget. Vattenhalten har en inverkan på de kemiska processerna i förvaret, till exempel armeringsjärnens korrosionshastighet.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Metod och modellutveckling för beräkningar av vattenflöden på förvarsskala har genomförts i programmet Comsol Multiphysics, som del av SR-PSU. Modellen beskriver befintligt SFR och utbyggnaden med en förfinad geometrisk representation av förvarsdelar, barriärer och avfall jämfört med SAR-08, se figur 20-1. Beräkningar har kvantifierat vattenflöden i förvaret givet ingående förutsättningar. Storlek och riktning på flödena genom avfallet påverkar transporten av radionuklider ut ur förvaret.

Forskningsbehov rörande avfallets hydrauliska egenskaper kan komma att identifieras inom SR-PSU.



Figur 20-1. Geometribeskrivning av befintligt SFR och utbyggnaden vilken ingår i en flödesmodell för förvarets närzon.

20.1.6 Mekaniska spänningar

I avfallet kan det initialt förekomma mekaniska spänningar orsakade av egentynghet samt expansion/kontraktion av avfallet och materialet i avfallsbehållarna. Avfallet och dess behållare kan även utsättas för extern mekanisk påverkan, vilket ligger till grund för acceptanskriterierna för de mekaniska egenskaper hos vissa avfallskollin. Stapling av avfallsbehållare utförs på ett sådant sätt att behållarna inte kollapsar av sin egen tyngd och/eller övergjutning. Avfallsbehållarna och dess kringgjutning kan under vattenmättnadsfasen ha en stödjande funktion för omgivande barriärer. För avfallsbehållare som kringgjuts utgör förmågan att ta upp mekaniska spänningar ett acceptanskriterium för avfallet.

SKB följer fortsättningsvis utvecklingen inom ämnesområdet.

20.1.7 Totalt radionuklidinventarium

Vid förslutning av SFR kommer det att innehålla radionuklider från driftavfall, avfall från nedmontering och rivning av kärnkraftverken samt mindre mängder från industri och forskning. SKB beräknar och följer ständigt utvecklingen av inventariet för att säkerställa att innevarande strålskyddsvillkor inte överskrids. Bestämning av radionuklidinnehållet sker dels genom mätningar och beräkningar av årlig uppkommen aktivitet på kärnkraftverken och dels genom korrelation mellan svärmätbara nuklider och nyckelnukliderna kobolt-60, cesium-137 och plutonium-239/240.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 beskrev SKB arbetet med att säkerställa radionuklidinventariet i SFR och avsåg att genomföra en allmän inventering av osäkerheterna i mät- och beräkningsmetoder. Arbeta med att minska osäkerheter i radionuklidbestämningen är något som SSM uppmuntrade och framför allt utveckling av alternativ till de metoder som bygger på korrelation mellan svår- och lättmätbara radionuklider. SKB avsåg även att förbättra metoder för aktivitetsbestämning av de radionuklider där den totala aktiviteten som tillförs avfallet bestäms utifrån mätningar på reaktorvatten och förvaringsbassänger. Dessutom ville SKB utreda hur man på bästa sätt tar hänsyn till avklingning av kobolt-60 för avfall som löpande tillförs och mellanlagras i tankar en längre tid före gammamätning.

SSM såg positivt på den verksamhet som SKB bedriver tillsammans med kärnkraftverken när det gäller förekomst och egenskaper hos kol-14 i avfallet. SKB bör förvissa sig om att de studier som görs och de slutsatser som dras, står i samklang med de internationella ståndpunkterna på området.

SSM ansåg vidare att en bättre uppskattning av osäkerheten i radionuklidbestämningen behövs inför den kommande prövningen av ansökan enligt kärntekniklagen om SFR:s utbyggnad.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

SKB:s program för att bestämma radionuklidinventariet i SFR har fortsatt och ytterligare insatser har gjorts för att bättre bedöma inventariet av svärmätbara radionuklider såsom kol-14 (SKBdoc 1339709). Inom SR-PSU beräknas inventariet för radioaktivitet och material som förväntas deponeras i SFR, både för driftavfall samt avfall från nedmontering och rivning. Inom ramen för detta arbete har SKB gått igenom och sett över hur osäkerheter uppskattas och appliceras.

Beräkningsmetoden för att bestämma mängden transuraner och strontium-90 som tillförs avfallet från internkylkretsen vid mottagningsstationen i Clab, har setts över och metoden har anpassats till hur verksamheten bedrivs.

En inventering av tillgänglig information om mellanlagrade jonbytarmassor pågår.

SKB utreder och sammanställer varje enskilt kärnkraftverks radionuklidinventarium som ska deponeras i SFR till följd av att reaktorerna nedmonteras och rivs. I studierna för avveckling har blockvisa beräkningar gjorts av radionuklidsammansättningen i olika vattensystem och på systemtytor.

De mätningar som har utförts av KTH rörande avgången av kol-14-aktivitet vid bitumenkonditioneringen i FKA:s anläggningar visar att det vid torkningen (140 °C) avgår cirka 40 procent av innehållet av vätekarbonat ($\text{H}^{14}\text{CO}_3^-$) och 90 procent av myrsyra ($\text{H}^{14}\text{CO}_2\text{H}$). Myrsyran sönderdelas katalytiskt till kolmonoxid (^{14}CO) av korrosionsprodukter i jonbytaren vid 140 °C. Om torkningen sker vid 180 °C

avgår nästan 80 procent av vätekarbonaten. En del organiskt kol-14 avgår inte vid torkning eller strippning med svavelsyra. Det utgörs sannolikt av radiolytiskt bildade $R^{14}CO_2H$ -grupper där R utgörs av jonbytarens polymerskelett.

Program

Ytterligare mätningar än de som redovisades i Magnusson et al. (2007) behövs för att få ett säkrare statistiskt underlag för deponerad aktivitet av kol-14. Som ett led i att få bättre statistiskt underlag pågår det ett projekt där massor från kondensatrening från samtliga kokvattenreaktorer samt driftjonbytermassor från samtliga tryckvattenreaktorer analyseras. Detta kommer att ge ytterligare information om deponerad aktivitet av kol-14 i SFR, i både organisk och oorganisk form.

Den kol-14-aktivitet som återfinns i inducerade material, till exempel reaktortankar, skiljer sig i sammansättning jämfört med den som finns upptagen på jonbytermassor. Det kan bli aktuellt med mätningar och experiment för att ta reda på denna sammansättning.

SKB har begärt att Studsvik Nuclear AB ska inventera förekomsten av kol-14 vid sina anläggningar. SKB begär att få in information om hur mycket kol-14-aktivitet, och i vilken form, som har tagits emot vid företagets anläggningar sedan 1991 samt hur det har behandlats. Dessa undersökningar syftar till att fastställa hur mycket kol-14-aktivitet från icke kärntekniska anläggningar som har deponerats i SFR respektive förbränts eller mellanlagrats vid Studsvik Nuclears anläggningar.

SKB deltar i ett internationellt samarbete kring kol-14. Arbetet syftar till att öka förståelsen kring kol-14 i geologiska förvar. Som en del i samarbetet har det sökts forskningsbidrag från EU inom ramen för EU:s sjunde ramprogram för forskning och teknikutveckling (FP7).

SKB undersöker möjligheterna att ytterligare experimentellt mäta och bestämma förekomsten av de så kallade svårsmätbara radionukliderna, främst klor-36 och jod-129, som går att bestämma genom masspektrometriska metoder.

Den radionuklidsammansättning som tagits fram i studierna för avveckling i olika vattensystem och på systemytor kommer att analyseras vidare. Syftet är att förbättra eller ersätta de metoder som i dag används för att beräkna inventariet av svårsmätbara radionuklider genom korrelation mot cesium-137.

20.1.8 Materialsammansättning

Största volymen råavfall, avfall uppkommet vid de kärntekniska anläggningarna, utgörs av brännbart fast avfall. Genom förbränning, lokal slutförvaring vid kärnkraftverkens markförvar eller friklassning, blir den resterande volymen för deponering i SFR jämförelsevis liten. Råavfallet består huvudsakligen av cellulosa (papper, bomull och trä) och plast (till exempel polystyren, polyvinylklorid, polyetylen och polypropylen).

I SFR deponeras också jonbytermassor, mekaniska filterhjälpmedel, indunstarkoncentrat och fällnings slam. Stora delar av detta avfall är konditionerat, det vill säga solidifierat i cement eller bitumen.

En del av avfallsvolymen i SFR består av metaller, framför allt kolstål och rostfritt stål. Metallsrot uppkommer huvudsakligen under revisioner i samband med kassering, modifiering och renovering av utrustning. Inför utbyggnaden av SFR planeras det för att hela reaktortankar från kokvattenreaktorer ska slutdeponeras i SFR.

Bland ytterligare material som förekommer i avfallet kan nämnas mineralull (används för isolering), betong och tegel. Därutöver ingår ytterligare ett antal material och ämnen i mindre mängder.

I jonbytermassorna fastnar också rester, organiska komplexbildare, från de rengöringsmedel som används vid dekontaminering av radioaktiva ytor vid de kärntekniska anläggningarna.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 beskrev SKB det pågående programmet för att försöka kvantifiera mängden icke radioaktiva joner som tas upp på jonbytarmassor och därmed förväntas bli deponerade i SFR. I programmet beskrev också SKB det arbete som bedrivs för att minska mängden organiska komplexbildare som deponeras i SFR.

SSM påpekade i sin granskning att det är avfallets egenskaper vid deponeringstillfället som är av intresse för att kunna styra och kontrollera vad som händer med avfallet i förvaret på lång sikt. SSM ansåg att det kan finnas organiskt material i avfallet som behöver omprövas, till exempel vissa filterhjälpmedel.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Uppskattningar har gjorts över mängden avfall från nedmontering och rivning som kan komma att deponeras i SFR. Detta avfall består främst av metall och betong, vilket framgår av det redovisade materialinventariet som är framtaget inom SR-PSU. Detta inventarium ligger till grund för de vidare analyser som behövs för att säkerställa den långsiktiga säkerheten. Inventariet är baserat på faktiskt deponerade materialmängder samt prognostiserade mängder och uppskattningar gjorda i studierna för avveckling. Studierna för avveckling ingår som en del i ansökan enligt kärntekniklagen för utbyggnaden av SFR.

SKB har inventerat mängden inaktiva joner som teoretiskt kan tänkas deponeras i SFR via jonbytarmassor. Uppskattningarna bygger på kända materialsammansättningar i de material som används vid kärnkraftverken. Utifrån ett antal kända och antagna parametrar kan en korrosionshastighet hos systemytor för de olika reaktorsystemen beräknas. De korrosionsprodukter som bildas och löses i vattnet för det studerade systemet antas pessimistiskt upptas på jonbytarna till 100 procent. Studien visar att stora mängder inaktiva korrosionsprodukter i så fall deponeras i SFR.

De insatser som beskrevs i Fud-program 2010 angående utvecklingen av ett nytt rengöringsmedel har avslutats. I samband med detta har SKB skärpt sina riktlinjer för användandet av komplexbildare i den verksamhet som kan tänkas generera avfall som kommer att deponeras i SFR.

SKB har sedan den senaste säkerhetsredovisningen, SAR-08 (SKB 2008b), inventerat och uppskattat mängden organiska komplexbildare, inklusive nedbrytningsprodukter från cellulosa, som antas deponeras i SFR. Denna inventering ingår som bakgrundsmaterial i SR-PSU. Sedan den förra redovisningen (Fanger et al. 2001) har ny information samt kunskap om nedbrytningen av cellulosa framkommit (Glaus och Van Loon 2008). Likaså har de rengöringsprodukter som används vid dekontaminering bytts ut och/eller ändrat innehåll med avseende på organiska komplexbildare. Filterhjälpmedlet UP2 (en polyakrylonitril-baserad polymer) har utvärderats med avseende på hur dess nedbrytningsprodukter inverkar på sorptionen av radionuklider, se avsnitt 20.2.13 Sorption.

Program

Det är av vikt för analysen av den långsiktiga säkerheten att mängderna och förekomsten av material som deponeras i SFR är kända till en sådan grad att påverkan av dessa material kan utvärderas. Det kan därför bli aktuellt med ytterligare krav på redovisning av materialen i avfallet och dess mängder om det visar sig att detta behövs för att minska graden av pessimism i en säkerhetsanalys.

20.1.9 Vattensammansättning

Det grundvatten som tränger in i förvaret påverkas av materialen i förvaret. Sammansättningen hos vattnet i avfallet och förvaret inkluderar radionuklider och beror av degraderingsgraden i avfallet samt radionuklidernas löslighet. Eh, pH, jonstyrka, lösta specier samt gaser och koncentrationen av kolloider/partiklar samt vattenhalt (inklusive eventuella radionuklider och lösta gaser) i avfallsbehållare, avfall, tomrum, porer samt sprickor är relevanta ingående parametrar för vattensammansättningen. Vattnets sammansättning kommer även att påverkas av ett initialt mycket lågt vattenflöde genom förvaret, efter förslutning (se vidare avsnitt 22.2.4 Vattenuptag och -transport under omätade förhållanden samt 22.2.5 Vattentransport under mätade förhållanden). SFR är i dag täckt av

Östersjön och det inströmmade grundvattnet till förvaret karakteriseras av ett bräckt grundvatten. Referenssammansättningen på det inträngande salta grundvattnet som antas infiltrera och fylla upp förvaret kommer att ingå som underlag för ansökan enligt kärntekniklagen om utbyggnad av SFR och är då uppdaterad med avseende på nya platsdata (Nilsson et al. 2011).

Initialt kommer porvattnet i avfallet att påverkas av en blandning av betongporvatten med ett pH högre än 13 (vars kemiska sammansättning beror på mineralsammansättningen hos betongen och på hur betongen varit exponerad för grundvatten). Porvattensammansättningen inverkar på de kemiska processerna i förvaret, som till exempel armeringsjärnens korrosionsbenägenhet. Vattnet i förvaret kommer kort tid efter förslutningen att bli anoxiskt (Duro et al. 2012a).

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Porvattensammansättningen påverkas av kemiska processer i avfallet och delvis av sammansättningen hos det inträngande grundvattnet.

De nya termodynamiska modelleringar som gjorts för olika avfallsbehållare (i underlaget för ansökningarna om utbyggnaden av SFR) har bidragit till ökad kunskap av potentiellt ändrade redoxförhållanden på förvarsdjup. Känslighetsanalyser har gett insikt om relevansen att även förbättra transportparametrar för olika avfallstyper. Det är av mycket stor vikt att olika avfallstyper är välkarakteriserade för att kunna beräkna kemiska parametrar och utgöra ett underlag för radionuklidtransportberäkningar i den långsiktiga säkerhetsanalysen.

Program

Fortsatt utveckling av närzonsmodeller kommer att göras och om möjligt koppla dessa till kemiska reaktioner i avfallet.

20.1.10 Gasvariabler

De gasvariabler som kommer att påverka avfallet är mängden gas som uppstår och dess sammansättning. Hur stor volym gaserna upptar är beroende av deras respektive partialtryck och temperatur, men även gasernas löslighet, mättnadsgrad i vatten, samt storlek och riktning på gasflöden. Se även avsnitt 20.2.9 Vattentransport under mättade förhållanden.

SKB har i dagsläget inget program rörande gassammansättning och gasflöden vid initialtillståndet i det kortlivade avfallet. För program rörande forskning kring gasbildningsprocesser som kan påverka den långsiktiga säkerheten hänvisas till avsnitt 20.2.18 Mikrobiella samt 20.2.19 Metallkorrosion processer.

20.2 Processer

En rad processer kommer med tiden att förändra tillståndet i avfallet och i dess hålrum. Vissa sker under alla förhållanden, medan andra bara är möjliga när vatten trängt in i avfallet eller när anaeroba förhållanden råder.

Behovet av forskning kring de olika processerna kommer att identifieras utifrån SR-PSU. De i dagsläget identifierade forskningsbehoven beskrivs under varje enskild process.

20.2.1 Översikt av processer

De processer som påverkar förhållandena i avfallet och avfallsbehållarna kan delas in i sex olika huvudklasser: strålningsrelaterade processer, termiska processer, hydrauliska processer, mekaniska processer, kemiska processer samt radionuklidtransport. Under varje huvudklass kan ett antal olika processer förekomma och växelverka med varandra eller med andra processer.

Strålningsrelaterade processer

Strålningsintensiteten beror på inventariet av radionuklider och avfallets geometri.

Intensiteten av den strålning som förekommer i SFR är låg och har bedömts ha mindre påverkan på förvarets utveckling. Lokalt kan det förekomma avfallspaket med höga aktivitetsnivåer. Följande strålningsrelaterade processer behandlas i detta kapitel:

- Radioaktivt sönderfall, avsnitt 20.2.2.
- Stråldämpning och värmealstring, avsnitt 20.2.3.
- Strålningsinducerad nedbrytning av organiskt material, avsnitt 20.2.4.
- Vattenradiolys, avsnitt 20.2.5.

Termiska processer

Det finns få värmealstrande processer i SFR. Korrosion av aluminium skulle kunna vara ett tänkbart undantag, men har bedömts vara utan betydelse. Värmetransporten kan väsentligen förväntas ske genom värmeledning som styrs av materialens värmeledningsförmåga och värmekapacitet. I allt väsentligt kommer förvarets och därmed avfallets temperatur att bestämmas av värmeutbytet med omgivande berg och grundvatten. Avfallets inverkan på temperaturen är försumbar. Temperaturen inverkan på avfallsbehållare av betong och cementkringgjutet avfall är inte försumbar, då frysning förändrar betongens integritet. Följande termiska processer behandlas i detta kapitel:

- Värmetransport, avsnitt 20.2.6.
- Fasförändring/frysning, avsnitt 20.2.7.

Hydrauliska processer

Vattenflödet genom avfallet bestäms av vattengenomsläppligheten i de olika konstruktionsdelarna och komponenterna i förvaret samt av tryckgradienten. Flöden genom de olika förvarsdelarna är så pass låga att erosionen av de olika avfallsbehållarna kommer att vara försumbar i förhållande till den kemiska degraderingen. Om det samtidigt förekommer gas uppstår ett tvåfasflöde, där både vattenflödet och gasflödet påverkas av den relativa mätnadsgraden av respektive fas. Höga övertryck av innesluten gas kan ge ett lokalt förhöjt vattentryck och kan därför bli en drivkraft för vattenflödet ut ur dessa inneslutningar. Koncentrationsgradienter kan även orsaka vattenflöde via osmos, men processen har endast betydelse för nedbrytningen av bitumen. Storleken på vattenflödet i förvaret och i avfallet bestäms i hög grad av det omgivande grundvattenflödet. Följande hydrauliska processer behandlas i detta kapitel:

- Vattenuptag och transport under omättade förhållanden, avsnitt 20.2.8.
- Vattentransport under mättade förhållanden, avsnitt 20.2.9.

Mekaniska processer

Avfallet och avfallsbehållarna i de olika förvarsdelarna kommer att utsättas för extern mekanisk påverkan och inre mekaniska spänningar orsakade av egentygnd och volymförändringar. Detta påverkar spänningsfördelningen i avfallet och avfallsbehållarna, vilket i sin tur kan leda till sprickbildning. Om det genereras gas som inte kan transporteras vidare kan detta leda till tryck- och spänningsuppbyggnad som i sin tur kan leda till sprickbildning. Slutligen kommer avfallet att påverkas av eventuella deformationer i berget (nedfallande block, bergrörelser, jordskalv med mera). Bergutfall behandlas i avsnitt 22.2.10.

Följande mekaniska process behandlas i detta kapitel:

- Sprickbildning, avsnitt 20.2.10.

Kemiska processer

Egenskaperna hos olika avfallsformer och avfallsbehållare påverkas av flera kemiska processer som omkristallisation, vattenupptag, kemisk och mikrobiell nedbrytning, korrosion av metaller, lösning/fällning samt bildandet av olika korrosionsprodukter med gasutveckling som följd. Vattnets sammansättning förändras på grund av advektion och blandning. Koncentrationskillnader utjämnas via diffusion. Sorptionen av radionuklider påverkas till största delen av vattensammansättningen i förvaret. Halten av ämnen som förekommer i små mängder, till exempel komplexbildare, kan ha en stor inverkan på sorptionen av katjoner som finns lösta i vattnet. Den mikrobiella aktiviteten i förvaret bestäms i första hand av tillgången på organiskt material, vilket påverkas av grundvattenflödet (Pedersen 2001).

Följande kemiska processer behandlas i detta kapitel:

- Advektiv transport av lösta ämnen, avsnitt 20.2.11.
- Diffusiv transport av lösta ämnen, avsnitt 20.2.12.
- Sorption, avsnitt 20.2.13.
- Kolloidbildning och kolloidtransport, avsnitt 20.2.14.
- Upplösning, utfällning och omkristallisation, avsnitt 20.2.15.
- Kemisk degradering av organiska ämnen, avsnitt 20.2.16.
- Vattenupptag/svällning, avsnitt 20.2.17.
- Mikrobiella processer, avsnitt 20.2.18.
- Metallkorrosion, avsnitt 20.2.19.
- Gasbildning och gastransport, avsnitt 20.2.20.

Radionuklidtransport

Flera av de processer som presenteras i detta kapitel påverkar transport av radionuklider inom och från förvaret. Transport sker med advektion och dessutom sker dispersion och blandning. I förvarsdelar med liten vattenströmning, till exempel inne i avfallsbehållare eller inne i facken i silon eller i BMA, förväntas diffusion vara den viktigaste transportmekanismen. Sorption är den viktigaste fördröjande mekanismen. Koncentrationen av olika radioaktiva ämnen har i tidigare säkerhetsanalyser ansetts vara för låg för att göra fällning till en viktig fördröjande funktion, om man bara ser till radionuklidkoncentrationen. Däremot skulle medfällning med icke radioaktiva ämnen kunna vara en viktig fördröjningsprocess för vissa radionuklider. Den kemiska, mekaniska och mikrobiella nedbrytningen av bitumen påverkar frigörelsen från bitumenavfallet. Förutom dessa finns det flera olika processer som påverkar radionuklidtransport och som hanteras av koder som används för säkerhetsanalyserberäkningar.

Följande radionuklidtransportprocesser behandlas i detta kapitel:

- Speciering av radionuklider, avsnitt 20.2.21.
- Radionuklidtransport i vattenfas, avsnitt 20.2.22.
- Radionuklidtransport i gasfas, avsnitt 20.2.23.

20.2.2 Radioaktivt sönderfall

Radionukliderna i SFR kommer med tiden att omvandlas till stabila ämnen genom radioaktivt sönderfall. Processen ger upphov till alfa-, beta- gamma- och neutronstrålning samt nya nuklider. Dessa nya nuklider kan också vara radioaktiva och fortsätta att sönderfalla tills en stabil nuklid har bildats. Nästan all energi som bildas i processen omvandlas till värme, se avsnitt 20.2.3 Stråldämpning och värmealstring.

Processen är fundamentalt viktig särskilt eftersom den beskriver hur radiotoxiciteten förändras med tiden.

Sönderfallsprodukter kan ha kemiska egenskaper som skiljer sig från sin modernuklid, detta kan påverka utsläpps- och transportegenskaper.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Inom SR-PSU har halveringstiderna för de radionuklider som ansetts relevanta för säkerhetsanalysen gått igenom och uppdaterats (där så ansetts nödvändigt). Halveringstider är generellt sett välkända med undantag av selen-79 vars halveringstid har diskuterats i litteraturen. Det senaste publicerade värdet är $327\,000 \pm 8\,000$ år (Jörg et al. 2010). Tidigare uppskattningar varierar kraftigt, se till exempel (He et al. 2002). Det senaste publicerade värdet på halveringstiden för silver-108m är 435,7 år (Schrader 2010). Detta skiljer sig endast obetydligt ur ett säkerhetsanalysperspektiv från det värde som använts tidigare, 418 år (SKB 2008a).

SKB har inget program för att studera halveringstider, men följer den utveckling som sker och uppdaterar databasen när så är nödvändigt.

20.2.3 Stråldämpning och värmealstring

Strålningen från det radioaktiva sönderfallet interagerar med avfallsformen och/eller andra material i förvaret. Den frigjorda energin överförs till de omgivande materialen. Det mesta av energin kommer att omvandlas till termisk energi. Värmealstringen till följd av stråldämpning anses ändå vara försumbar i SFR.

Den vetenskapliga litteraturen i ämnet har gått igenom av experter sedan Fud-program 2010 och presenteras i den processrapport som beskriver avfallsformen samt avfallspaketet. Denna rapport utgör ett underlag till SR-PSU.

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap för nya insatser om skäl för detta framkommer.

20.2.4 Strålningsinducerad nedbrytning av organiskt material

Organiskt material som finns i avfallet kan påverkas av den joniserande strålning som utsänds från avfallet. Detta kan leda till att molekyler exciteras eller joniseras antingen direkt eller indirekt via radikaler producerade från vattenradiolys, se avsnitt 20.2.5 Vattenradiolys. Detta leder till produktion av en stor mängd organiska radikaler och till slut till stabila molekylära produkter.

Omfattningen av processen är en funktion av strålningsintensiteten, som avtar allteftersom radioaktiviteten avklingar. I det korta tidsperspektivet kommer processen att domineras av strålning från kobolt-60 följt av cesium-137. I det långa perspektivet, mer än 1 000 år, kommer olika radionuklider att få betydelse för processen i olika delar av SFR, beroende på deras radionuklidinnehåll.

Vid radiolytisk nedbrytning av jonbytmassor kan sulfat och oxalat bildas (Van Loon och Hummel 1999). Sulfat förväntas bilda ettringit (ett hydrerat kalcium-aluminium-sulfat) vid reaktion med cement och betong. Oxalat påverkar sorptionen av metaller vid neutrala till sura förhållanden. Vid de förhållanden som råder i betongmiljö är effekten begränsad dels på grund av att hydroxidjonerna tävlar med oxalat gällande komplexbindningen, dels på grund av utfällning av oxalat som kalciumoxalat.

Det har visats att radiolytisk nedbrytning av bitumen vid höga pH-värden huvudsakligen resulterar i mono- och dikarboxylater och karbonater (Van Loon och Kopajtic 1991). Av dessa är det oxalat som skulle kunna vara en tänkbar komplexbildare men enligt resonemanget ovan bedöms oxalat ha försumbar påverkan på sorptionen av radionuklider.

Den vetenskapliga litteraturen i ämnet har gått igenom av experter sedan Fud-program 2010 och presenteras i den processrapport som beskriver avfallsformen samt avfallspaketet. Denna rapport ingår som ett underlag till SR-PSU.

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap för nya insatser om skäl för detta framkommer.

20.2.5 Vattenradiolys

Det vatten som tränger in i SFR och i avfallspaket kommer att påverkas av den joniserande strålningen. Detta bidrar till att vattenmolekyler exciteras och joniseras då vattnets kemiska bindningar bryts. I SFR är strålningsintensiteten så låg att radiolys av vatten inte bedöms ha någon signifikant

påverkan på den långsiktiga säkerheten. De insatser som SKB bedriver för att öka kunskapen och processförståelsen kring vattenradiolys sker främst inom ramen för forskningen kring det använda kärnbränslet, se avsnitt 23.2.4 Vattenradiolys.

20.2.6 Värmetransport

Värmetransporten mellan de olika komponenterna kan väsentligen förväntas ske genom värmeledning, som styrs av materialens värmeledningsförmåga och värmekapacitet. I allt väsentligt kommer förvarets och därmed avfallens temperatur att bestämmas av värmeutbytet med omgivande berg och grundvatten, medan avfallens inverkan på temperaturen kan betraktas som försumbar.

SKB ser i dag inget behov av ett forskningsprogram rörande värmetransport i det kortlivade låg- och medelaktiva avfallet.

20.2.7 Fasändring/frysning

Avfall och avfallsbehållare samt i- och kringgjutningsbruk kan frysa i samband med att en permafrost når förvarsdjup. Omfattningen av detta är direkt beroende av hur länge permafrostperioden varar och på vilket djup förvaret är placerat.

Effekten av en frysning är beroende av aktuell materialtyp. Exempelvis förväntas metaller i avfallet inte påverkas direkt av en frysning, medan i- och kringgjutningsbruk liksom avfallsbehållare av betong skulle kunna frysa sönder på samma sätt som betongbarriärerna. Metallbehållare skulle dock kunna spräckas i samband med en frysning om innehållet expanderar i tillräcklig omfattning.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Denna process redovisades endast kortfattat i Fud-program 2010 med en hänvisning till forskningen rörande frysning av de tekniska betongbarriärerna. SSM framförde inga synpunkter på det i sin granskning.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

SKB har inte bedrivit någon forskning rörande fasändring/frysning av det kortlivade låg- och medelaktiva avfallet under den gångna perioden. Däremot har ett par studier rörande frysning av betongbarriärer genomförts vilka redovisas i avsnitt 22.2.3 Fasändring/frysning. Då i- och kringgjutningsbruk kan förväntas påverkas på samma sätt som betong vid en frysning kan dessa studier anses relevanta även inom detta område.

Program

SKB ser i dag inget behov av ett separat forskningsprogram rörande fasändring/frysning av det kortlivade låg- och medelaktiva avfallet och dess i- och kringgjutningsbruk utan har för avsikt att samordna detta arbete med forskningen kring frysning av betongbarriärerna, se avsnitt 22.2.3 Fasändring/frysning.

20.2.8 Vattenupptag och transport under omättade förhållanden

Under driftskedet hålls förvaret torrt genom dränagepumpning. Efter förslutning kommer grundvattnet mätta sprickor och porer i berget nära förvaret. Grundvattnet fortsätter därefter fylla tomvolymen i förvarssalarna och gradvis mätta olika konstruktionsmaterial och avfallspaket. Vattenupptag och transport av vatten under omättade förhållanden är bara relevant under en relativt kort initial tidsperiod. Enligt beräkningar vattenfylls den minst genomsläppliga förvarsdelen i SFR på 25 år (Holmén och Stigsson 2001). Förvarets vattenfyllning utgör startpunkten för transportprocesser vilka kan frigöra radionuklider.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 beskrivs vattenupptag i bitumenstabiliserat avfall. Vattenupptaget är en förutsättning för att radionuklider ska frigöras från avfallsmatrisen. I granskningen av Fud-programmet

kommenterade SSM att de längsta tiderna för frigörande av radionuklider, som angivits till 1 000 år eller mer, endast kan gälla exempelvis avfall stabiliserat med en ideal process vilken skapar en helt homogen avfallsprodukt.

I SKB:s modeller för radionuklidtransport antas ingen fördröjningseffekt relaterad till frigörande av radionuklider från bitumenmatriser.

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap för nya insatser om skäl för detta framkommer.

20.2.9 Vattentransport under mättade förhållanden

När förvaret mättats med vatten kommer den hydrauliska gradienten att driva vattenflödet genom avfallet. Flödets storlek bestäms av gradient och konduktivitet hos avfallspaketen och återfyllningsmaterialiet. Även närvaron av hålrum eller sprickor i avfallet har en inverkan. Vattentransporten genom avfallspaket, konditionerat och okonditionerat avfall samt avfallsmatriser betraktas som relativt snabb. Det som begränsar flödet genom avfallet är i första hand omgivande barriärer av betong och bentonit. Sett över lång tid kommer flödet genom avfallet att ändras. Förändringar i grundvattenflödet som ett resultat av landhöjning är en anledning. Vidare förväntas en successiv degradering av barriärer och avfall vilket påverkar materialens genomsläpplighet för vatten.

Program

Detaljerade studier av vattenflödet genom enskilda avfallsbehållare är för närvarande inte planerade, då flödet genom barriärer anses gränssättande. Program för modellering av vattenflöden kopplade till betongdegradering beskrivs i avsnitt 22.2.5 Vattentransport under mättade förhållanden.

20.2.10 Sprickbildning

I SFR kan ett flertal olika processer leda till att det uppstår sprickor i avfall, avfallskollin, i- eller kringgjutningsbruk. I vilken mån ett material kan spricka styrs av dess egenskaper. Ett sprött material som exempelvis betong har en större benägenhet att spricka under en pålagd last än ett segare material såsom stål.

Av de i SFR förekommande materialtyperna bedöms i- och kringgjutningsbruk samt betongkokiller och betongtankar vara de som främst utsätts för sprickbildning medan plåtkokiller, ISO-containerar och plåtfat förväntas vara betydligt mindre sprickbenägna.

Effekterna av sprickbildning i avfallet, dess behållare eller i- och kringgjutningsbruk är svåra att förutse. Processen som sådan hanteras dock pessimistiskt och ingen säkerhetsfunktion ansätts för avfallet eller dess behållare. För betongtankarna som innehåller avvattnad jonbytarmassa, där tankens täthet utgör den enda barriären, kan dock effekten av sprickbildning bli mer påtaglig.

De viktigaste processer som kan leda till sprickbildning i avfallet, avfallsbehållare samt i- och kringgjutningsbruk är:

- Upplösning, utfällning och omkristallisation, avsnitt 20.2.15.
- Gasbildning orsakad av kemisk degradering av organiska ämnen, avsnitt 20.2.16.
- Vattenuptag/svällning, avsnitt 20.2.17.
- Metallkorrosion, avsnitt 20.2.19
- Gasbildning orsakad av metallkorrosion, avsnitt 20.2.19.
- Fasändring/frysning, avsnitt 22.2.3.

Av dessa processer bedöms främst vattenuptag/svällning, metallkorrosion samt fasändring/frysning kunna orsaka sprickor i större omfattning i avfall och avfallskollin. Det är även möjligt att processen upplösning, utfällning och omkristallisation skulle kunna leda till sprickbildning i betongbehållare som innehåller sulfonatjonbytarmassa genom reaktioner mellan betongens komponenter och sulfonatjonbytarmassans nedbrytningsprodukter, se även avsnitt 22.2.15 Upplösning, utfällning och

omkristallisation. Däremot bedöms den gas som bildas genom de övriga processerna kunna släppas ut ur avfallskollina vid ett tillräckligt lågt övertryck så att behållarens integritet inte ska äventyras.

Samtliga ovanstående processer beskrivs i mer utvecklade form under respektive avsnitt.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 redovisades forskningen rörande sprickbildning i det kortlivade låg- och medelaktiva avfallet, dess behållare samt i- och kringgjutningsbruk översiktligt med hänvisning till de processer som ansågs kunna orsaka sprickbildning. I sin granskning framförde SSM inga synpunkter på det redovisade programmet, men ställde sig frågande till varför sprickbildning till följd av sulfatangrepp på betong inte togs upp under denna rubrik.

Program

Programmet kring processer som kan orsaka sprickbildning i kortlivat låg- och medelaktivt avfall, avfallskollin samt i- och kringgjutningsbruk redovisas under respektive avsnitt, se ovan. Utöver dessa processer behandlas upplösning, utfällning och omkristallisation av betongbarriärer i avsnitt 22.2.15 Upplösning, utfällning och omkristallisation.

20.2.11 Advektiv transport av lösta ämnen

Advektiv transport av lösta ämnen i cementkonditionerat avfall hanteras på samma sätt som i betongbarriärer, se avsnitt 22.2.11 Advektion och blandning. För andra avfallsformer antas ingen transportbegränsning.

20.2.12 Diffusiv transport av lösta ämnen

Diffusiv transport av lösta ämnen i cementkonditionerat avfall hanteras på samma sätt som i betongbarriärer, se avsnitt 22.2.12 Diffusion. För andra avfallsformer antas ingen transportbegränsning.

20.2.13 Sorption

Sorption av radionuklider är en av de viktigaste fördröjande mekanismerna i SFR. Sorptionen sker huvudsakligen på cementen i barriärerna och avfallsmatrisen och beror på den kemiska sammansättningen hos vattnet i förvaret.

Sorption av radionuklider förväntas i samtliga förvarsdelar och i det omgivande berget. Den största potentialen för sorption har dock de förvarsdelar där rikliga mängder betong finns närvarande, såsom i väggar, kringgjutning eller avfallskollin. Den mängd betong som finns i SFR har en stor specifik yta av olika CSH-faser (kalciumsilikahydrat).

Sorption av radionuklider kan också ske på andra material än cement/betong, till exempel på bitumen, stål, papper, plast med mera. Sorptionen på dessa material tas det inte hänsyn till i SKB:s säkerhetsredovisningar för SFR. Däremot tas hänsyn till sorptionen på bentonit och sand/grus, se kapitel 25 Buffert och återfyllning.

Under driften av SFR bildas korrosionsprodukter som järnoxider och järnhydroxider, som kan sorbera och möjligen samfälla många element. Detta indikerar att utfällning av korrosionsprodukter är en process som kan påverka radionuklidtransporten i förvaret.

Vikten av säkerhetsfunktionen sorption i betongbarriärer är starkt kopplad till kemiska egenskaper hos individuella radionuklider. Vissa radionuklider kommer inte att sorberas under några förhållanden och där gäller säkerhetsfunktionen inte alls. De flesta radionuklider kan dock antas sorberas under de förhållanden som råder i SFR. För många radionuklider är sorptionen kopplad till den kemiska miljön i förvaret. De olika radionukliderna kommer dock att påverkas på olika sätt av den kemiska miljön.

Den kemiska miljön i cementporerna med högt pH-värde och höga kalciumhalter, gör att karbonathalten med nödvändighet blir låg, eftersom den regleras av kalcitjämvikten. Höga halter fritt karbonat skulle annars kunna bidra till en ökad radionuklidtransport ut ur förvaret. Höga pH-värden och

höga kalciumhalter håller på samma sätt nere halten av ett flertal andra ligander, som oxalat. Andra ligander, som till exempel alfa-isosackarinat, sorberar till cement, möjligen genom komplexbildning med kalciumrika fasta faser (Bradbury och Van Loon 1997, Van Loon och Glaus 1997, 1998). En del av radionukliderna är redoxkänsliga och för vissa är sorptionen avsevärt svagare vid oxiderande förhållanden, se avsnitt 20.2.21 Speciering av radionuklider.

Organiska ämnen från nedbrytning av avfallet (särskilt cellulosa) kan bilda komplex med radionukliderna och på så sätt konkurrera med sorptionen på de fasta ytorna. Det är viktigt att hålla mängden komplexbildare på låga nivåer. Den mest betydelsefulla organiska komplexbildaren i SFR, enligt den processrapport som tas fram som ett underlag till SR-PSU, är isosackarinat, se avsnitt 20.2.16 Kemisk degradering av organiska ämnen.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 beskrevs hur osäkerheterna hos olika radionuklidens sorptionskoefficienter (K_d) i betong, bentonit och sand/grus har uppskattats och bestämts. I och med att en datarapport tas fram inom SR-PSU kommer K_d -värdenas osäkerheter att hanteras på ett formellt sätt. De framtagna värdena som kommer att användas i säkerhetsanalysen inom SR-PSU, bygger på genomgång av relevant litteratordata. I sin granskning av Fud-program 2010 påpekade SSM att SKB bör utveckla en systematisk metod och modeller för att hantera inverkan av komplexbildning på sorption av radionuklider i slutförvaret.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

En modell för att kunna bedöma påverkan av organiska komplexbildare på sorptionen av radionuklider för cementbaserade material har tagits fram. Modellen tar hänsyn till speciering och löslighet i närvaro av organiska ligander. De sorptionsprocesser som antas äga rum på cementmaterialen har tagits i beaktande och implementerats genom att ta hänsyn till jämviktskonstanterna (K_{ads}). Detta kan användas i bedömningen om huruvida avfallet är lämpligt att deponera i SFR med tanke på innehållet av organiska komplexbildare. Studierna av hur nedbrytningsprodukter från filterhjälpmedlet UP2 (polyakrylnitrilbaserad polymer) inverkar på sorptionen av cesium(I), kobolt(II) och europium(III) har rapporterats (Holgersson et al. 2011). Detta arbete i kombination med de data över hur nedbrytningsprodukter av UP2 påverkar sorptionen av europium(III) som presenteras av Duro et al. (2012b) pekar på att nedbrytningsprodukter från filterhjälpmedlet UP2 inte påverkar sorptionen nämnvärt negativt.

Inom SR-PSU har nya K_d -värden tagits fram. K_d för de olika degraderingsstadierna för betong presenteras i detta material, vilket gör det möjligt att välja K_d för olika tidsperioder.

Program

SKB har startat studier kring sorption av radionuklider på cement. Studierna syftar till att bättre förstå de sorptionsmekanismer som förekommer i SFR i den rådande miljön med högt pH-värde, lågt Eh-värde och förekomst av komplexbildare. En viktig del av arbetet är att skaffa kunskap kring hur interaktionen mellan radionuklider och cement påverkas vid närvaro av organiska komplexbildare och kalciumjoner.

Andra studier av vikt är att utvärdera sorptionsegenskaperna hos åldrad cement. Den kemiska sammansättningen hos åldrad cement kan modelleras med termodynamiska beräkningar, till exempel med programmet Phreeqc (Cronstrand 2007). Utifrån denna kunskap bör det vara möjligt att få fram nya sorptionskoefficienter för cementens olika åldringsstadier. Detta kan i sin tur leda till ökad kunskap om de sorberande egenskaperna hos kemiskt partiellt degraderade barriärer och hur dessa egenskaper påverkar framtida radionuklidutsläpp från förvaret.

När vissa radioaktiva katjoner transporteras ut genom betongen, antingen som hydroxidkomplex eller metallorganiska komplex, kommer de att påverkas av en ständigt förändrad kemisk miljö. Detta beror på att grundvatten tränger in och förändrar den kemiska sammansättningen hos betongen på olika djup i betongstrukturen. Denna förändrade miljö påverkar specieringen och lösligheten hos de olika radionukliderna. Hur detta påverkar retardationen av radionuklider kan komma att bli föremål för vidare modelleringsutredningar.

20.2.14 Kolloidbildning och kolloidtransport

Kolloiders stabilitet och transport är beroende av vattnets kemiska sammansättning, det vill säga lösningens jonstyrka, redox samt pH, men även av vilken sorts kolloid som finns i lösningen och dess egenskaper. Andra parametrar av intresse kan vara mängder och typ av mikrober, annan biomassa, mängder och sammansättning av gas, densitet samt viskositet (om vattnet har en mycket hög salthalt).

Kolloider karakteriseras enligt dess pH_{pzc} (det pH vid vilken kolloidens ytladdning är noll och kallas point of zero charge). Hög jonstyrka i lösning leder till att kolloider faller ut, eftersom hög jonstyrka minskar det elektriska dubbellagrets repulsionskraft. Kolloiden aggregerar eller faller ut det vill säga sedimenterar.

I cementporvattnet med alkalina pH-värden kan kolloidbildning däremot vara gynnsam eftersom kolloider där i högre grad kan vara negativt laddade, det vill säga resulterar i negativt laddade ytor. Vid högt pH är halten av hydroxidjoner $[OH^-]$ hög, vilket i detta fall kan öka kolloiders stabilitet.

Om det finns organiska ämnen i lösning kan det leda till att kolloiders stabilitet ökar i avfallet (bitumen). Bitumenkolloider är förhållandevis stabila vid höga pH-värden och Liu et al. (2002) fann att deras stabilitet påverkades i närvaro av kalciumjoner.

Organiska föreningar finns i alla naturliga vatten och kan utgöra en stor del av den kolloida poolen i akvatiska medier. I en nyligen genomförd granskning utförd av Nuclear Decommissioning Authority (NDA) på kolloider i närområdet av ett cementbaserat slutförvar konstaterade författarna att det inte fanns någon platspecifik information om kolloidal generering och stabilitet av organiska material i närområdet, vars konfidens kan ökas genom vidare studier (Swanton et al. 2010).

Förutsättningarna för kolloidgenerering från bentoniten i silon kan förändras under en istidscykel. Under en inlandsis eller en förlängd period av global uppvärmning skulle saltfattigt vatten kunna tränga ned till förvarsdjup. Om det kommer i kontakt med bentonitbufferten finns det potential för montmorillonitkolloider att frigöras för vidare transport, se avsnitt 25.5.19 Kolloidfrigörelse/erosion.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I granskningen av Fud-program 2010 ansåg SSM att SKB bör studera förslutningens långsiktiga stabilitet med avseende på degradering av betongmaterial samt kemisk erosion av bentonit med glacialt smältvatten.

Vidare ansåg SSM att ett förslutet SFR utgör en ganska unik miljö med komplex kemi och att förekomst av kolloider inte kan uteslutas av de skäl som SKB anger. Betongmiljön som SKB åberopar är sannolikt mycket ojämnt fördelad i tid och rum inom slutförvaret.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

Inom SR-PSU behandlas kolloidbildning och kolloidstabilitet och dess betydelse för säkerheten gällande SFR. Drivkraften för reaktion är mycket hög vid gränsen av cement och bentonit, alternativt cement och mineralytor, eftersom en kraftig pH-gradient initialt kommer att spänna över pH-värden mellan 8 och 13. Här kan potentiellt kolloider bildas. Stabilitetskriterier är specifika för varje typ av kolloid och kan inte generaliseras. Frigörelsen och stabiliteten av cementkolloider/bentonitkolloider i denna specifika vattenkemi bör undersökas.

Program

Som startförsök ska den eventuella frigörelsen av kolloider från cement till vatten med högt pH-värde undersökas, därefter stabiliteten av dessa kolloider i vattenmiljön. Sedan undersöks interaktionen mellan bentonit och cement och frigörelsen av kolloider från denna gränsyta, för att i nästa steg undersöka stabiliteten av eventuella partiklar som formats av bentonit och cement. Försöken med cement eller cement/bentonit i kontakt med vatten kommer att göras med varierande pH och jonstyrka.

Kolloidkoncentration, partikelstorleksfördelning och ytladdning bestäms genom olika mätningar i lösning. Metallinnehållet i vatten mäts också med ICP-AES (Inductively coupled plasma – atomic

emission spectroscopy). Parallellt till lakningsförsök utförs klassiska stabilitetstester där cement, cement och bentonit samt komplexbildare slammas upp i olika kemiska miljöer, där koncentrationen i lösning mäts med avseende på tid. För lakningsförsöken används celler där pluggar av material installeras och sedan jämviktas med vatten från två håll. Efter jämviktning cirkuleras vatten genom cellerna och lakning av kolloider mäts.

Vid Äspölaboratoriet pågår försök med ett antal stålcylindrar som innehåller bland annat bitumen. Miljön i stålcylindrarna försöker efterlikna den miljö som förväntas råda i respektive förvarsdelar efter förslutning avseende betong och syrefria förhållanden. Under den kommande Fud-perioden planeras en behållare med bitumen och cement att öppnas och en metod för analys kommer att utvecklas.

20.2.15 Upplösning, utfällning och omkristallisation

Upplösning av avfallet frigör joner från jonbytmassor och mobiliserar ämnen som blir tillgängliga för transport. Processer som vattentransport kan ändra vattensammansättningen och specieringen kommer att ändras när kemiska jämvikter inställer sig. Detta kan leda till att ämnen lösta i vattnet faller ut och immobiliseras. Upplösning av salt från indunstarkoncentrat frigör klorider, karbonater och sulfater som i sin tur reagerar med omgivande betongbarriärer och jonbytmassor. Hur snabbt upplösningen sker beror på hur avfallet är konditionerat och inneslutet. I analysen för den långsiktiga säkerheten för SFR antas att alla radionuklider från cementingjutet avfall är tillgängliga för transport när förvaret vattenfylt.

Vattenuptaget i bitumenmatrisen är långsamt, vilket innebär att upplösningen och frigörelsen av lösta salter sker under en relativt lång tidsperiod. Detta talar för att påverkan på omgivande betong bör vara liten. Man kan inte helt utesluta att de lösta salterna (framför allt de första 1 000 åren) kan koncentreras i så hög grad, att närliggande betong kan påverkas med porositetsförändringar och eventuellt sprickbildning som följd. SKB har i tidigare studier låtit utreda konsekvenserna av deponerade salter i SFR, främst i form av indunstarkoncentrat (Gaucher et al. 2005). Dessa studier pekar på att om betong utsätts för höga koncentrationer indunstarkoncentrat kan det inte uteslutas att betongen närmast indunstarkoncentratet degraderar, det vill säga lakning av portlandit och dekalCIFIERING, i en snabbare takt än om så inte vore fallet. Degraderingshastigheten beror till viss del på tillgången av kalciumjoner. Degraderingshastigheten av betong ökar om tillförseln av kalciumjoner är begränsad. Detta innebär att degraderingen av betongbarriärerna närmast cementkonditionerat indunstarkoncentrat är lindrigare än för bitumenkonditionerat, eftersom tillgången på kalciumjoner i utrymmen som innehåller bitumenkonditionerat avfall är lägre än i utrymmen med betongkonditionerat avfall.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 beskrevs denna process under rubrikerna Expansion/kontraktion av avfallet och Sprickbildning. SSM påpekade att kunskapen om nedbrytningen av sulfonerad polystyren är bristfällig. Nedbrytningen av sådan jonbytmassa skulle kunna leda till stora mängder sulfat, vilket kan påverka avfallsformen och dess omgivande betongstrukturer.

SSM ville påminna SKB om att ett sätt att öka trovärdigheten för en relativt sprickfri silo under längre tid skulle vara att bättre uppskatta hastigheten hos de aktuella degraderingsmekanismerna.

SSM ställde sig tveksam till påståendet om att tillförd expansionsvolym i silon skulle vara tillräcklig, eller tillgänglig, för att ta upp all volymexpansion.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2010

Användningen av rengöringsmedel som innehåller organiska komplexbildare har vid kärnkraftverken bytts ut mot ett karbonatbaserat medel, som bara innehåller oorganiska komplexbildare. Detta kommer att leda till ökade nivåer av karbonater i vissa avfallstyper i SFR. Avfallet som kommer att innehålla dessa förhöjda nivåer kan antingen vara solidifierat i cement eller i bitumen. SKB har låtit utreda konsekvenserna för barriärerna och avfallsbehållarna av förhöjda karbonathalter i avfallet. Detta har gjorts genom termodynamisk modellering där förändrad mineralsammansättning i betongen på grund av förhöjda halter karbonat har studerats.

Studien visar att lokala effekter på den omgivande barriären inte kan uteslutas på grund av lokalt förhöjda karbonathalter. Avfallsbehållare som inte är deponerade i anslutning till den tekniska barriären kommer att ha mindre påverkan på degraderingshastigheten på grund av en ökad buffrande effekt av den omkringliggande betongen.

Program

Det program som initierats för att öka förståelsen kring upplösning, utfällning och omkristallisation beskrivs i avsnitt 22.2.15 Upplösning, utfällning och omkristallisation samt avsnitt 22.2.16 Porvattenspeciering och betonginteraktioner.

20.2.16 Kemisk degradering av organiska ämnen

Kemisk degradering av organiska ämnen och material i avfallet eller dess matris, kan generera produkter som påverkar förvarets långsiktiga säkerhet. Bildandet av produkter som har en komplexbildande förmåga kan under vissa omständigheter påverka sorptionen och därmed radionuklidtransporten. Olika radionuklider kommer att påverkas i olika utsträckning. Vilka radionuklider som bildar lösliga komplex med organiska komplexbildare påverkas i hög grad av i vilket oxidationstal radionukliden befinner sig och om det bildade metallorganiska komplexet är starkare än det hydroxidkomplex som bildas när den organiska komplexbildaren är frånvarande.

En viktig mekanism för nedbrytandet av organiska ämnen och material i avfallet är hydrolys vid de höga pH-värden som genereras i cementporvattnet.

Ett antal organiska avfallskomponenter har undersökts med avseende på alkalisk nedbrytning. Nedbrytningsprodukternas påverkan på sorptionen och lösligheten av ett antal radionuklider har undersökts (Ewart et al. 1991, Duro et al. 2012b). De flesta av dessa ämnen är inte relevanta för den långsiktiga säkerheten av SFR, medan andra kan ha betydelse, vilket kommer att redovisas i en rapport som utgör underlag för SR-PSU. Störst inverkan har isosackarinat (ISA) som förekommer i två diastereomera former, alfa respektive beta (Greenfield et al. 1993), figur 20-2.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 beskrev SKB översiktligt vilka insatser som hade gjorts och planerades för att öka förståelsen kring betydelsen av organiska komplexbildares påverkan på sorptionen av radionuklider.

SSM ansåg att det var viktigt att planera insatser på detta område utifrån en systematisk analys av både förekomst av olika ämnen och av de möjliga nedbrytningsprodukternas komplexbildande egenskaper. En sådan analys bör givetvis inte bara omfatta nedbrytningsprodukter, utan också ämnen som från början finns i slutförvaret.

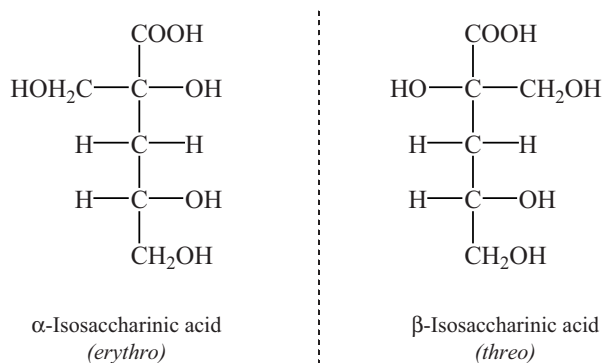
Nyvetenskap sedan Fud 2010

Det arbete som har bedrivits vid Chalmers tekniska högskola för att studera nedbrytningen av cellulosa till de två diastereomera formerna alfa- och beta-isosackarininsyra har lett till att en syntesväg finns framtagen för att framställa alfa- och beta-isosackarininsyra i dess rena former (SKBdoc 1378692), se figur 20-2.

Ett arbete har bedrivits för att kvantifiera mängden cellulosa som kommer att finnas i avfallet vid förslutning av förvaret. För BMA har mängden cellulosa kvantifierats för varje fack och mängden bildad isosackarinat har beräknats med hjälp av de hastighetskonstanter som presenteras i Glaus och Van Loon (2008).

Nedbrytningsprodukterna av filterhjälpmedlet UP2 bedöms inte längre bidra till minskad sorption av radionuklider (Duro et al. 2012b).

Vissa av de arbeten som SKB har bedrivit inom området kopplar starkt till sorptionen av radionuklider. En del av resultaten inom detta ämnesområde presenteras därför i avsnittet 20.2.13 Sorption.



Figur 20-2. Alfa-isosackarinsyra till vänster respektive beta-isosackarinsyra till höger.

Program

I Äspölaboratoriet har betongcylindrar med bland annat jonbytarmassor placerats. Syftet med detta är att studera nedbrytningen av avfallet samt hur nedbrytningsprodukterna transporteras i betongmaterialet. Studiens upplägg är inte sådant att resultaten kan användas för att göra en kvantitativ bedömning av nedbrytningshastigheten för de olika avfallskomponenterna. I stället ligger fokus främst på att studera nedbrytningsprodukter och hur dessa sprids i bruket. Parallellt med detta pågår laboratorieexperiment med ett likande upplägg, vars syfte främst är att tjäna som referens för när det kan vara lämpligt att återta experimenten i Äspölaboratoriet.

20.2.17 Vattenupptag/svällning

När avfallet, framför allt jonbytarmassor, tar upp vatten ökar det i volym och hela avfallsmatrisen sväller. I en bitumenmatris sker vattenupptag genom diffusion in mot jonbytarmassor och salt i industarkoncentrat. Då vatten rör sig genom bitumen samtidigt som avfallsmaterialet är solidifierat kan bitumenmatrisen ses som ett semipermeabelt membran och processen betraktas som osmotisk. På grund av de spänningar som svällningen orsakar kan sprickor uppstå i matrisen och ett sammanhängande porsystem skapas. Svällning kan också påverka omgivande avfallspaket och barriärer om inte tillräcklig expansionsvolym finns tillgänglig. Graden av svällning påverkas av en rad faktorer, till exempel mängd, typ och kvalitet av jonbytarmassa samt hur den förbehandlats då avfallet stabiliserats. Sammansättningen och mängden av närvarande industarkoncentrat är också viktig.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 beskrevs expansion av avfallet. En förutsättning för att undvika skador på omgivande barriärer är att tillräcklig expansionsvolym finns tillgänglig. Om tomvolymen i ett avfallspaket skulle vara otillräcklig kan ytterligare tomvolym krävas utanför paketen. I granskningen kommenterade SSM att de önskade se en uppdatering av kunskapsläget i denna process och nämner här särskilt siloförvaret. En vidare utredning av mekanisk påverkan som ett resultat av svällande avfall beskrivs vidare i avsnitt 22.2.7 Tryck från svällande avfall.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

En litteraturgenomgång, inom ramen för säkerhetsanalysen för SR-PSU, har resulterat i en sammanställning av data vilka beskriver förhållandet mellan svälltryck och tillgänglig expansionsvolym för bitumenstabiliserat avfall i SFR. Dessa data sammanfattas i tabell 20-2.

Fältet bevakas med beredskap för nya insatser om skäl för detta framkommer.

Tabell 20-2. Svälltryck för bitumenstabiliserat avfall som funktion av expansionsvolym.

Relativ expansionsvolym (%)	0	10	20	30
Genomsnittligt svälltryck (MPa)	6	0,7	0,3	0,1
Maximalt svälltryck (MPa)	12	2,5	0,75	0,22

20.2.18 Mikrobiella processer

Det organiska materialet i avfallet i bergssalen för lågaktivt avfall (IBLA), framför allt cellulosa, utgör en möjlig energi- och näringskälla för mikroorganismer. Den mikrobiella aktiviteten är beroende av att ett vattenflöde passerar förvaret, bland annat för transporten av näringsämnen och energikällor till mikroorganismer, men också för borttransporten av toxiska nedbrytningsprodukter som bildas vid fermentation. Initialt kommer pH ligga på omkring 12,5, men det förväntas sjunka till omkring 9 eller lägre efter cirka 2 000 år. Under denna tid kommer den mesta cellulosan att omvandlas till isosackarinsyra (ISA) som skulle kunna användas som kolkälla för mikrober. I övriga förvarsdelar i SFR förväntas pH initialt vara högt (högre än 13). Detta gör att den mikrobiella aktiviteten förväntas vara låg, men öka med tiden när pH sjunker i takt med nedbrytningsstadierna för cement, för att landa på pH 12,5.

Organiskt kol från avfall och reducerade oorganiska molekyler såsom vätgas från anaeroba korrosionsprocesser och metan från organiska substanser är möjliga elektron-donatorer och energikällor för mikrobiella processer i SFR. Under mikrobiell oxidation av dessa energikällor reducerar mikroorganismer elektron-acceptorer i en särskild ordning: syre, nitrat, mangan, järn, sulfat, svavel och koldioxid. Så länge syre ner till svavel i denna kedja är tillgängliga, kommer det mikrobiella bildandet av metan-gas vara undertryckt.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

Den processrapport som har tagits fram inom SR-PSU går igenom det uppdaterade kunskapsläget inom området. Där finns även referenser till de nyaste forskarrönen rörande alkalifila mikroorganismer.

Program

I nuläget kan SKB, baserat på kunskapen om mikrober och den litteratur som finns i ämnet, endast anta vilka mikroorganismer som finns i grundvattnet i SFR. SKB bedömer därför att det är nödvändigt att göra en kartläggning av vilka mikroorganismer som verkligen finns och vilka förutsättningar dessa har att vara aktiva i den miljö som kommer råda i SFR efter förslutning. I SFR finns stor tillgång på organiskt kol i såväl jonbyttarmassor som cellulosa. I dessa finns kol-14, som potentiellt kan nå markytan. Det är dock endast kolet i cellulosa som bedöms vara tillgängligt för mikrober. Alkalisk hydrolys av cellulosa under anoxiska förhållanden bildar främst isosackarinsyra (ISA) och endast en mindre mängd (mindre än 10 procent) lågmolekylära kolföreningar bedöms konsumeras snabbt av mikroberna (Glaus et al. 1999). ISA kan, om den utgör den dominerande kolkällan, användas av en del mikrober. Även om ISA-nedbrytande mikrober inte är aktiva när förvaret försluts, är det möjligt att en blandad population kan anpassa sig till att använda ISA som kolkälla. Detta skulle i så fall ske när ISA-koncentrationen ökar till följd av ökad alkalisk nedbrytning av cellulosa. Metanogener (metanproducerande arkéer) har dock sitt optimala pH vid 6–8 och den övre pH-gränsen ligger runt pH 10. När ISA bryts ner bildas koldioxid och metan i lika stora mängder. Koldioxiden absorberas i betongen, medan metangasen kan leda till uppbyggnad av tryck. För att ta reda på hur mycket metan som kan bildas under de förhållanden som råder i förvaret och om det finns mikrober med potential att bryta ner ISA i SFR, kommer experiment att göras i samarbete med TVO (Teollisuuden Voima Oyj) i Finland. Mikrober tas då från ett SFR-liknande förvar och försök görs i laboratorium för att undersöka om några specier kan börja använda ISA som kolkälla.

20.2.19 Metallkorrosion

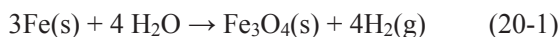
Korrosion, alltså nedbrytning av metall genom en kemisk process, är en av de processer som har störst inverkan på ett slutförvar, dess tekniska barriärer och dess förmåga att begränsa utsläpp av radionuklider. Korrosionshastigheten har stor inverkan på livslängden hos de tekniska barriärerna och bestämmer med vilken hastighet det metalliska avfallet bryts ner och inducerad aktivitet frigörs.

I SFR förekommer stora mängder metall i form av avfall, avfallsbehållare och armering i avfallsbehållare av betong. Denna metall kommer att korrodera under förvarets livstid men vilken korrosionsprocess som dominerar liksom korrosionshastigheten styrs av miljön i förvaret. Under förvarets drifttid och kort efter förslutning då syre fortfarande finns tillgängligt, kommer korrosionen att domineras av aeroba processer medan de långsiktiga processerna kommer att domineras av anaeroba korrosionsförlopp.

Den tydligaste effekten av korrosion är den sprickbildning som uppkommer genom armeringskorrosion. Detta orsakas av att korrosionsprodukterna upptar en större volym än ursprungsmaterialet och därmed spräcker konstruktionerna inifrån (Betongföreningen 2007).

Sprickbildning kan även orsakas av höga gastryck inne i förvaret. Den bakomliggande processen är den anaeroba korrosionen vid vilken vätgas produceras.

För järn och stål motsvarar korrosionen av en mikrometer en vätgasproduktion på cirka 4,5 liter per kvadratmeter om processen följer ekvation 20-1, nedan.



Korrosionshastigheten för en metall beror på den kringliggande miljön. Viktiga faktorer som påverkar korrosionen är tillgång till vatten och vattenkemin, främst pH, Eh och koncentrationen av lösta salter. Av dessa faktorer är troligen pH-värdet den viktigaste, då ett högt pH-värde försätter järn och stål i ett så kallat passivtillstånd med en låg korrosionshastighet som följd. Stål i kontakt med cementbaserade material som betong och kringgjutningsbruk befinner sig i ett passivtillstånd då pH i denna miljö är cirka 12,5.

Det passiva tillståndet i betongen kan dock brytas genom karbonatisering där portlanditen (Ca(OH)_2) omvandlas till kalciumkarbonat (CaCO_3) till följd av koldioxidinträngning eller kemisk degradering av organiska ämnen, se avsnitt 20.2.16 Kemisk degradering av organiska ämnen. Passiveringen kan även brytas genom inträngning av kloridjoner från grundvattnet. När det passiva tillståndet bryts kommer korrosionshastigheten att öka betydligt. Detta innebär att både nedbrytningen av förvars-konstruktionerna liksom utsläppshastigheten av radionuklider kommer att öka.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 presenterades planer och program för forskningen rörande korrosion av kortlivat och långlivat låg- och medelaktivt avfall gemensamt. Bland annat redovisades det då precis initierade experimentprogrammet i Äspölaboratoriet och planerna på laboratorieexperiment.

I sin granskning av Fud-program 2010 framförde SSM inga invändningar mot det planerade programmet, men påpekade dock bristen på redovisning av ett program kopplat till korrosion av aluminium. Detta ansåg man skulle kunna vara en brist om osäkerheterna för detta förlopp är stora i ett tidigt skede efter förslutning. SSM påpekade även vikten av att en eventuell framtida litteraturstudie kring korrosionshastigheter måste fokusera på miljöer som liknar den i SFR.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

SKB har genomfört en litteraturstudie i syfte att skapa en uppdaterad bild över forskningsläget rörande korrosion av stål, aluminium och zink i olika miljöer. Denna studie har visat att de korrosionshastigheter som SKB tidigare har antagit och vilka har använts i tidigare analyser varit väl pessimistiska. I tabellerna 20-3, 20-4 och 20-5 redovisas de korrosionshastigheter som kommer att användas i den kommande säkerhetsanalysen för SFR.

Tabell 20-3. Korrosionshastigheter för kolstål i olika miljöer.

Förvarsmiljö	Korrosionshastighet ($\mu\text{m}/\text{år}$)	Referens
Alkalisk aerob	0,1	Blackwood et al. 2002
Alkalisk anaerob	0,05	Smart et al. 2004
Neutralt pH aerob	60	Kuron et al. 1985
Neutralt pH anaerob	2,8	Simpson och Weber 1988, Schenk 1988, Simpson et al. 1985

Tabell 20-4. Korrosionshastigheter för rostfritt stål i olika miljöer.

Förvarsmiljö	Korrosionshastighet (µm/ år)	Referens
Alkalisk aerob	0,02	Treadaway et al. 1989
Alkalisk anaerob	0,01	Mihara et al. 2002
Neutralt pH aerob	0,3	Kritsky et al. 1987
Neutralt pH anaerob	0,2	Naish et al. 2001

Tabell 20-5. Korrosionshastigheter för aluminium och zink.

Förvarsmiljö	Korrosionshastighet (µm/ år)	Referens
Alkaliska anoxiska förhållanden	1 000	Moreno et al. 2001

Program

I Äspölaboratoriet har betongcylindrar med bland annat järn- och stålprover placerats. Syftet med detta är att studera nedbrytning av avfall samt hur nedbrytningsprodukterna transporteras i betongmaterialet och interagerar med detta. Studiens upplägg är inte sådant att resultaten kan användas för att göra en kvantitativ bedömning av nedbrytningshastigheten för de olika avfallskomponenterna. Fokus ligger i stället främst på att studera nedbrytningsprodukterna, och hur dessa sprids i och interagerar med bruket. Parallellt med detta pågår laboratorieexperiment med ett likande upplägg vars syfte främst är att tjäna som referens för när det kan vara lämpligt att återta experimenten i Äspölaboratoriet.

SKB har även påbörjat en översyn av de mängder aluminium som avfallsproducenterna avser att deponera i SFR. Syftet med detta arbete är att erhålla en mer korrekt bild av gasbildningen orsakad av korrosion av aluminium under förvarets tidiga skede efter förslutning.

20.2.20 Gasbildning och gastransport

Gas bildas i SFR som resultat av ett flertal olika kemiska processer som förekommer i avfallet, där vattenradiolys, mikrobiell nedbrytning av organiskt material och metallkorrosion utgör de mest betydande. De gaser som bildas vid mikrobiell nedbrytning av organiskt material omfattar huvudsakligen metan och koldioxid. Vid anaerob metallkorrosion bildas vätgas, vilket beskrivs i avsnitt 20.2.19 Metallkorrosion. Vid radiolys av vatten bildas syrgas och vätgas, men denna process bedöms ge ett lägre bidrag till gasbildningen i SFR eftersom vattenradiolysen är av underordnad betydelse för SFR, se avsnitt 20.2.5 Vattenradiolys.

De bildade gaserna kommer att lösa sig i vattnet tills det är mättat. Vissa gaser, såsom exempelvis koldioxid, kan även reagera kemiskt med vatten och bilda karbonat. Lösta gaser kan transporteras genom avfallet genom advektion och diffusion. Om gashalten överstiger vattnets mättnadsgrad bildas fri gas som föreligger som bubblor i vattnet, vilket möjliggör transport i form av ett tvåfasflöde. Det förhöjda trycket detta medför i systemet, kan påskynda transport av radionuklider i lösning genom avfallsmatrisen. I och med bildandet av en gasfas kan även transport av gasformiga radionuklider underlättas, vilket främst avser radioaktiv metangas som bildats. När gstrycket har ökat till den grad att det överstiger avfallsmatrisens motståndskraft, kommer sprickor att kunna bildas så att gas kan frigöras, se avsnitt 20.2.10 Sprickbildning.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Denna process beskrevs inte explicit i Fud-program 2010 och SSM framförde i sin granskning inga synpunkter på detta.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

SKB har inte genomfört någon forskning rörande gasbildning och gastransport i kortlivat avfall under den gångna Fud-perioden utöver det som beskrivs i avsnitt 20.2.18 Mikrobiella processer och avsnitt 20.2.19 Metallkorrosion.

Program

SKB har i dag inget separat forskningsprogram rörande gasbildning och gastransport i kortlivat avfall. De insatser som görs inom området beskrivs i avsnitten 20.2.18 och 20.2.19. Som resultat av kommande analys av den långsiktiga säkerheten i SFR kan dock ett specifikt program komma att formuleras.

20.2.21 Speciering av radionuklider

Specieringen av de radionuklider som finns i SFR beror på pH samt oxidationstalet på varje radionuklid. pH i förvaret förändras över tiden, varvid specieringen av vissa pH-känsliga radionuklider kommer att ändras och deras sorptionsförmåga kommer att påverkas. Hur pH ändras över tiden kommer att redovisas inom SR-PSU. Redoxkänsliga radionuklider kan komma att påverkas av ändrade redoxförhållanden inne i förvaret.

Syret som finns i förvaret vid förslutning kommer snabbt att förbrukas främst genom korrosion av stål samt genom oxidation av löst järn(II). En låg redoxpotential kommer att bibehållas i de olika förvarsdelarna så länge som järn(II)joner finns närvarande. Eftersom SFR är ett relativt ytnära förvar kan det inte uteslutas att oxiderande förhållanden inne i förvaret kan uppkomma främst genom inträngandet av syresatt smältvatten från framtida inlandsisar.

Organiska komplexbildare kan komma att påverka specieringen och sorptionen för vissa radionuklider och därmed påverkas radionuklidtransporten ut ur förvaret. Om oxiderande förhållanden råder kommer redoxkänsliga ämnen att oxidera. Ett ändrat oxidationstal på vissa radionuklider kan medföra att dess speciering, komplexeringsförmåga med organiska komplexbildande ämnen samt sorberande förmåga förändras. Detta i sin tur påverkar radionuklidtransporten och vattensammansättningen.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

De program som beskrevs i Fud-program 2010 som eventuellt skulle kunna realiseras, har inte realiserats. SSM ansåg att den viktigaste frågan i detta sammanhang i stället är hur speciering inverkar på radionuklidernas sorption. Detta bör göras baserat på en mer systematisk ansats än vad som gjorts tidigare på området. SSM påpekade i samband med granskningen av SAR-08 att det till exempel finns en risk för att förvarets redoxbuffrande förmåga skulle utarmas på sikt och oxiderande förhållanden uppstå. Detta skulle kunna resultera i betydande dosbidrag för redoxkänsliga radionuklider särskilt teknetium-99. SSM påpekade att denna fråga borde utredas av SKB.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

SKB har låtit undersöka SFR:s reducerande kapacitet genom teoretiska studier och modelleringar. De framtagna modellerna baseras på tolv representativa avfallstyper, som deponeras i SFR. Modellen har tagit hänsyn till olika geokemiska processer som är relevanta för utveckling av förvarets redoxkapacitet.

Resultaten pekar på att korrosionen av stål från behållare, avfall och armeringsjärn kan upprätthålla reducerande förhållanden under en lång tidsperiod. En känslighetsanalys har genomförts med avseende på korrosionshastigheten av stål. Resultatet från denna analys pekar på att den reducerande miljön i förvaret bibehålls även med högre korrosionshastigheter. I rapporten tas också hänsyn till att syresatt grundvatten (glacialt smältvatten) kan komma att tränga ner i förvaret. I modellen tas inte hänsyn till när ett sådant fall kan tänkas inträffa, utan i stället utreds konsekvenserna för avfallstypen S.13 (askfat från Studsvik Nuclear AB). Detta för att S.13 har lägst reducerande kapacitet av de studerade avfallstyperna. Inträngandet studeras också vid den tidpunkt där allt järn(0) har ansatts vara korroderat (Duro et al. 2012a).

Fältet bevakas med beredskap för nya insatser om skäl för detta framkommer.

20.2.22 Radionuklidtransport i vattenfas

Omfattande beräkningar av radionuklidtransport för SFR utfördes inom säkerhetsanalysprojektet SAR-08 (SKB 2008a). Grunden för dessa beräkningar (elementuppdelning samt den ingående hydrogeologiska modellen) var motsvarande transportberäkningar som utfördes inom det tidigare säkerhetsanalysprojektet Safe – Safety Assessment of Final Repository for Radioactive Operational Waste (Lindgren et al. 2001). I samband med SAR-08 implementerades dessa i ett annat beräkningsprogram. Den tidsperiod analysen omfattade utökades även så att påverkan av klimatförändringar kunde inkluderas.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

Efter SAR-08 har utvecklingsarbetet fortsatt och i SR-PSU kommer Ecolego att användas för att modellera radionuklidtransport. SKB har numera en modell av SFR och dess framtida utbyggnad i Ecolego där både mer komplicerade och mer förenklade transportmodeller analyserats.

Indata för denna analys kommer i form av de processbeskrivningar som presenteras i kapitel 20, 21 och 22 i Fud-program 2013 samt de geometribeskrivningar och avfallsbeskrivningar som tas fram inom SR-PSU. Därutöver kommer indata från andra typer av modelleringsaktiviteter, såsom exempelvis de hydrogeologiska beräkningar som presenteras i kapitel 26 Geosfären, och detaljerade beräkningar av flöde i närområde som presenteras i avsnitt 20.1.5 Hydrovariabler.

Program

För de insatser SKB bedriver inom området se avsnitten 22.1.4 Hydrovariabler, 22.1.5 Mekaniska spänningar och 22.2.5 Vattentransport under mättade förhållanden.

20.2.23 Radionuklidtransport i gasfas

Efter förslutning pågår flera gasgenererande processer i SFR. Under en inledande fas genereras gas i huvudsak från korrosion av det aluminium och zink som finns i delar av det deponerade avfallet, se avsnitt 20.2.19 Metallkorrosion. Andra gasgenererande processer är mikrobiell nedbrytning samt korrosion av järn. Viss del av den genererade gasen kommer att lösas i vatten och transporteras i vattenfas. Inget behov av en separat hantering av radionuklidtransport i gasfas har identifierats vid tidigare säkerhetsanalyser.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

Betydelsen av denna transportmekanism och behov av att studera detta explicit pågår inom den säkerhetsanalys som ingår i ansökan enligt kärntekniklagen för ett utbyggt SFR.

Program

Betydelsen av processen radionuklidtransport i gasfas utvärderas i säkerhetsanalysen SR-PSU som färdigställs under våren 2014. Eventuellt program utformas utifrån de behov som identifieras i säkerhetsanalysen.

21 Långlivat låg- och medelaktivt avfall

I detta kapitel beskrivs SKB:s naturvetenskapliga forskning kopplad till det långlivade låg- och medelaktiva avfallet och de förvarskomponenter som detta kommer att komma i kontakt med.

I och med att det ännu inte finns ett färdigt slutförvarskoncept för det långlivade avfallet kommer processerna att beskrivas något mer övergripande än för det kortlivade avfallet. Detta innebär att kopplingen mellan avfall och förvarsutrymmen kommer att göras via de använda materialen snarare än att vara direkt kopplade till ett visst förvarsutrymme. En utgångspunkt i det forskningsprogram som beskrivs i detta kapitel är att cementbaserade material kommer att förekomma i förvaret, antingen i form av i- eller kringgjutningsbruk eller i form av förvarskonstruktioner och återfyllning. Om det i en framtida säkerhetsanalys framkommer att andra material eller materialkombinationer är att föredra för den långsiktiga säkerheten kommer detta forskningsprogram att behöva omarbetas. SKB anser dock i dagsläget att antagandet att förvaret kommer att innehålla cementbaserade material, vilka säkerställer ett högt pH, är den mest lämpliga utgångspunkten.

Den forskning SKB planerar att genomföra för att öka förståelsen kring hur de tekniska betongbarriärerna i Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall, SFR, och det framtida Slutförvaret för långlivat avfall, SFL, degraderas behandlas i kapitel 22 medan bentonit behandlas i kapitel 25. För den forskning som SKB bedriver för att öka förståelsen av geosfären och ytnära ekosystem hänvisas till kapitel 26 och 27.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 beskrevs den naturvetenskapliga forskningen för det långlivade låg- och medelaktiva avfallet översiktligt och endast ett fåtal områden berördes. I övrigt hänvisades till programmet för naturvetenskaplig forskning kopplat till det kortlivade låg- och medelaktiva avfallet. SSM konstaterade att programmet för SFL till stora delar överensstämde med det för SFR och hade önskat att redovisningen för SFL hade följt samma systematik som den för SFR.

Kommentarer från SSM rörande allmänna frågor kring SFL tas upp i kapitel 6.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Sedan redovisningen av Fud-program 2010 har arbetet med SFL konceptstudie inletts och sammanställs för att kunna presenteras under december 2013. Detta arbete har pekat på behovet att strukturera och redovisa den forskning som kommer att krävas inför framtida säkerhetsanalyser på motsvarande sätt som för säkerhetsanalysen för utbyggnaden av SFR.

I detta kapitel beskrivs därför forskningen kring avfallets förmodade initialtillstånd och de processer som förväntas påverka avfallet efter slutförvarets förslutning. Utgångspunkten i beskrivningen har varit att SFL ska vara ett geologiskt förvar och att betong, grus och bentonit kan komma att utgöra komponenter i de tekniska barriärerna. Eftersom detta är det första Fud-program där forskningen kring långlivat låg- och medelaktivt avfall beskrivs på detta sätt, ligger fokus på beskrivning av variabler och processer samt program, snarare än slutsatser och nyvetenskap sedan Fud-program 2010.

För en beskrivning av avfallets uppkomst och hantering samt arbetet med uppdateringen av referensinventariet för SFL hänvisas till kapitel 6.

21.1 Initialtillstånd i avfallet

Initialtillståndet för avfallet i SFL definieras som det tillstånd som råder vid förslutning. I samband med förslutningen kommer dränagepumpning i förvaret att upphöra, vilket gör att det vattenfylls och avfallet vattenmättas. I detta avsnitt görs en ansats att presentera ett initialtillstånd för avfallet i SFL, trots att ett definitivt förvarskoncept saknas. Ansatsen grundas på att samma förvarskomponenter som används i SFR även kommer att ingå i det framtida slutförvarskonceptet för SFL. Detta innebär

att betong och/eller bentonit, kommer att interagera med och påverkas av det grundvatten som kommer att tränga in i förvaret efter förslutning. Med detta som bakgrund antas därför att de processer som kan komma i fråga i SFL kommer att vara likartade de som förväntas ske i SFR.

För att fastställa initialtillståndet i avfallet är det viktigt att ha kännedom om hur avfallet är konditionerat. I dag planeras hårdkomponenter att placeras i avfallsbehållare av stål som kringgjutts med ett cementbaserat material, vilket gör bestämningen av initialtillståndet relativt enkel. Även det historiska avfallet ska enligt planerna placeras i stålbehållare. Vid bestämning av dess initialtillstånd finns en betydande osäkerhetsfaktor på grund av ofullständig kännedom om avfallets sammansättning. Genom arbetet med uppdateringen av referensinventariet kommer SKB:s kunskap om det historiska avfallet att öka, liksom möjligheterna att korrekt fastställa förvarets initialtillstånd.

21.1.1 Variabler

Initialtillståndet är startpunkten för en analys av långsiktig säkerhet. Tillståndet beskrivs av de initiala värdena hos ett antal variabler, som karakteriserar avfallet på ett lämpligt sätt för säkerhetsanalysen, se tabell 21-1. Beskrivningen gäller inte bara själva avfallet, utan även hålrummen som finns i och mellan avfallsbehållarna dit vatten kommer att tränga in. I hålrummen kommer processer som advektion och blandning att äga rum.

21.1.2 Geometri

SFL kommer att innehålla avfall med olika geometrier och som kommer att vara förpackat i avfallsbehållare med olika egenskaper beroende på typ av avfall. En geometriparameter utöver mått för avfallsbehållarna, är andelen hålrum som finns i avfallskollina. Begreppet hålrum omfattas här av porsystemet i det cementbruk som används för att fylla mellanrummet mellan de enskilda behållarna i förvaret samt för att fylla ut tomrummen i avfallsbehållarna. Det omfattar även de volymer i och mellan olika avfallskollin som varken innehåller avfall eller cementbruk. Andelen hålrum i förvaret påverkar advektion och diffusion och därmed transporten av radionuklider.

Program

SKB:s arbete inom detta område är i dagsläget fokuserat på utveckling av avfallskollin, konditioneringsmetoder och förvarskonstruktioner, se avsnitt 8.2 Slutförvar för långlivat avfall. Vid utvecklingen av avfallskollin för SFL måste hänsyn tas till att det i dag finns en stor mängd avfall, som redan är konditionerat i olika typer av avfallskollin, exempelvis fat och kokiller. För att skapa ett enhetligt transport- och hanteringssystem för SFL är avsikten att placera befintliga avfallskollin i nya stålbehållare med enhetliga planmått. Mellanrummet mellan de enskilda kollina planeras att fyllas med

Tabell 21-1. Variabler för avfallet i SFL.

Variabel	Definition	Avsnitt
Geometri	Geometriska mått för samtliga avfallsbehållare.	21.1.2
Strålningsintensitet	Intensitet av alfa-, beta-, och gammastrålning som funktion av tid och rum i avfallet.	21.1.3
Temperatur	Temperatur som funktion av tid och rum i avfallet.	21.1.4
Hydrovariabler	Vatten- och gstryck i avfallet och avfallsbehållarnas hålrum samt vattenflöden från omgivningen som funktion av tid och rum.	21.1.5
Mekaniska spänningar	Mekaniska spänningar som funktion av tid och rum i avfallskollin.	21.1.6
Totalt radionuklidinventarium	Total förekomst av radionuklider som funktion av tid och rum i avfallets olika delar.	21.1.7
Materialsammansättning	De material som avfallets olika delar består av, exklusive radionuklider.	21.1.8
Vattensammansättning	Sammansättning av vatten och vattenhalt (inklusive eventuella radionuklider och lösta gaser) i avfallet och avfallets hålrum som funktion av tid och rum.	21.1.9
Gasvariabler	Sammansättning av gas (inklusive eventuella radionuklider) i avfallet och i avfallets hålrum som funktion av tid och rum.	21.1.10

ett cementbruk för att minska tomrumsvolymen och stabilisera de enskilda kollina under transport. Utvecklingen av detta cementbruk samt kringgjutningsbruk och appliceringsmetoder, kommer att påbörjas när utvecklingen av avfallskollina är färdig.

21.1.3 Strålningsintensitet

Strålningsintensiteten beror på inventariet av radionuklider och avfallets geometri. Strålningsintensiteten hos avfallet som planeras att deponeras i SFL bedöms inte vara tillräckligt hög för att ha något annat än en marginell inverkan på förvarets utveckling.

Program

SKB:s program inom detta område är främst inriktat på uppdateringen av referensinventariet och den därmed förknippade kartläggningen av radionuklidinnehållet i avfallet, se avsnitt 6.4 Uppdatering av referensinventariet. Fortsatta planer inom området kommer att upprättas när detta arbete är färdigt.

21.1.4 Temperatur

Den initiala temperaturen i förvaret sätts av det omgivande bergets temperatur och årsmedeltemperaturen förväntas vara cirka +15 °C. Initialt bedöms inga värmealstrande processer förekomma i avfallet, främst på grund av att det saknas tillräcklig mängd vatten, mikrobiell aktivitet och strålningsenergi.

Program

SKB kommer att invänta resultaten från uppdateringen av referensinventariet innan några eventuella planer inom detta område upprättas. Av främst intresse är här det historiska avfallet för vilket vissa osäkerheter fortfarande råder.

21.1.5 Hydrovariabler

Randvillkoren som styr vattenflödet genom avfallet ges av det omgivande tryckfältet. Detta fält beror i sin tur på förvarets layout och placering i berget, bergets hydrogeologiska egenskaper samt på egenskaperna hos de tekniska barriärerna. Den lokala flödesbilden påverkas vidare av storlek, form och materialegenskaper hos avfallet och dess behållare. Vattenflöden i avfallet förekommer inte vid deponering, eftersom förvaret dränagepumpas under driftskedet. När pumpningen upphör kommer förvaret att vattenfyllas. Detta utgör startpunkten för transportprocesser, vilka kan frigöra radionuklider.

Program

De initiala modellansatserna för utvärdering av flödet genom avfallet tas fram inom ramen för SFL:s säkerhetsvärdering.

21.1.6 Mekaniska spänningar

Under drift och i samband med förslutning kommer avfallet och avfallskollina att utsättas för laster av olika slag, som kan komma att orsaka mekaniska spänningar, främst tryckspänningar, i dessa. Under driftperioden kommer lasterna främst att orsakas av att kollina staplas på höjd samt av ett eventuellt kringgjutningsbruk i samband med driftförslutning, jämför med hanteringen i silon i SFR. I samband med att förvaret återfylls och vattenmätas, kan de krafter som då kommer att verka på förvarskonstruktionerna även att fortplantas in i kollina och avfallet.

I avsnitt 8.2 Slutförvar för långlivat avfall redovisas SKB:s planer för utvecklingen av avfallskollin och konditioneringsmetod för SFL-avfallet. Val av kolli och konditioneringsmetod har gjorts under förutsättningen att de laster som verkar på förvaret innan och i samband med förslutning, inte ska påverka kollin eller däri placerat avfall på ett negativt sätt.

Övriga processer som skulle kunna orsaka mekaniska spänningar i avfall eller avfallskolli – såsom gasbildning genom korrosion av avfallet, tryck från svällande avfall, tryck från bentonit samt bergutfall – förväntas inte ske i någon större omfattning under tiden före förslutning och bedöms därför inte ha någon avgörande påverkan på initialtillståndet.

SKB har i dagsläget inget program för forskning kring mekaniska spänningar i avfall och avfallskollin.

21.1.7 Totalt radionuklidinventarium

Det avfall som avses deponeras i ett framtida SFL utgörs främst av neutronbestrålade härdkomponenter från kärnkraftverken samt historiskt avfall som hanteras av SVAFO. För härdkomponenterna baseras radionuklidinventariet i första hand på beräkningar, medan det historiska avfallet karakteriseras genom mätningar.

Program

För att löpande uppdatera och minska osäkerheten i det totala radionuklidinventariet för SFL, kommer SKB att systematiskt utvärdera beräkningsmetodik och modeller för bestämning av aktivitetsinnehåll i interndelar från kärnkraftsreaktorer. Genom att jämföra resultat från olika metoder och modeller med uppmätt aktivitet, avser SKB att klargöra hur approximationer i metod och modell påverkar osäkerheten i beräkningsresultaten och på så sätt etablera bästa tillgängliga teknik vad gäller bestämning av aktivitet i interndelar. Vidare kommer SKB att bevaka SVAFO:s arbete med karakterisering av det historiska avfallet.

21.1.8 Materialsammansättning

Det avfall som avses att deponeras i det framtida SFL kan delas in i två huvudkategorier, avfall från de svenska kärnkraftverken samt historiskt avfall från utvecklingen av det svenska kärntekniska programmet, se även avsnitt 6.4 Uppdatering av referensinventariet.

Den största delen av avfallet från kärnkraftverken är metaller, framför allt kolstål och rostfritt stål som uppstått i samband med reparationer, uppgraderingar och som uppkommer vid nedmontering och rivning av kärnkraftverken. Huvuddelen av det metalliska avfallet är härdkomponenter och PWR-reaktortankar.

Materialsammansättningen hos det historiska avfallet är inte lika enhetlig utan kan i stället beskrivas som mycket komplex. I de många tusen avfallskollin som lagras på området i Studsvik förekommer olika metaller, askor, organiska ämnen och i viss omfattning även vätskor.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 beskrevs materialsammansättningen i det långlivade avfallet översiktligt. I sin granskning framförde SSM att man förväntar sig att det nya referensinventariet blir av minst lika god kvalitet som det som togs fram inför den säkerhetsanalys som genomfördes 1999 (Lindgren et al. 1998).

Nyvetenskap sedan Fud 2010

SKB har under de senaste åren i samarbete med kärnkraftverken och övriga avfallsleverantörer arbetat med att sammanställa ett nytt referensinventarium. Förutom en sammanställning av de radionuklider som förekommer i avfallet, inkluderar detta arbete även en sammanställning av material och mängder av övrigt avfall som avses att deponeras i SFL, se även avsnitt 6.4 Uppdatering av referensinventariet.

21.1.9 Vattensammansättning

Se avsnitt 20.1.9 Kortlivat låg- och medelaktivt avfall, Vattensammansättning och 22.1.7 Betongbarriärer, Vattensammansättning.

SKB har inga planer på att studera vattensammansättningen för SFL under kommande Fud-period.

21.1.10 Gasvariabler

Gasvariabler beskrivs i avsnitt 20.1.10.

21.2 Processer

En rad processer kommer med tiden att förändra tillståndet i avfallet och i de hålrum som kan förekomma inuti och mellan olika avfallskollin. Vissa processer sker under alla förhållanden, medan andra bara är möjliga vid vissa specifika förhållanden.

21.2.1 Översikt av processer

I detta avsnitt beskrivs de processer som kan förväntas påverka avfallet, avfallskollina liksom övriga material som kan användas för att stabilisera avfallet. Utöver detta beskrivs processer som kan påverka kvarstående tomrum och porer.

De aktuella processerna kan delas in i sex olika huvudklasser: strålningsrelaterade processer, termiska processer, hydrauliska processer, mekaniska processer och kemiska processer samt radionuklidtransport. Under varje huvudklass kan ett antal olika processer förekomma, och växelverka med varandra eller med andra processer.

Strålningsrelaterade processer

Radionuklider i avfallet avger vid sönderfall joniserande strålning av olika form och olika intensitet. Strålningen kan interagera med andra komponenter i avfallet och skapa nya kemiska species. Om strålningen är kraftig kan detta leda till bildandet av reaktiva radikaler, medan detta endast sker i begränsad omfattning ifall strålningen är mindre kraftig.

Följande strålningsrelaterade processer tas upp i detta kapitel:

- Radioaktivt sönderfall, avsnitt 21.2.2.
- Stråldämpning och värmealstring, avsnitt 21.2.3.
- Strålningsinducerad nedbrytning av organiskt material, avsnitt 21.2.4.
- Vattenradiolys, avsnitt 21.2.5.

Termiska processer

I SFL kommer en termisk växelverkan mellan avfall och förvarskonstruktioner och den kringliggande berggrunden att ske under förvarets hela operativa livstid. Denna växelverkan kan innebära att värmealstrande processer i avfallet påverkar avfallskollina, de tekniska barriärerna samt den kringliggande berggrunden likväl som att termiska processer i berggrunden påverkar de tekniska barriärerna och avfallet. Termiska processer i betongbarriärerna behandlas i avsnitt 22.2.2 Värmetransport och 22.2.3 Fasändring/frysning.

Värmealstrande processer förväntas endast ske i mycket begränsad omfattning, eftersom SFL-avfallets egenskaper inte är av den karaktären. I samband med uppdateringen av referensinventariet kan dock information framkomma som kräver en omvärdering av detta.

Förvarets temperatur kommer att styras av den omgivande berggrundens temperatur. Under normala betingelser har denna process liten betydelse för avfallet, dess kollin och eventuellt kringliggande material. I samband med frysning under en permafrost skulle dock frostkänsliga fasta material såsom betong och eventuella vätskor i avfallet kunna påverkas. I och med att förvaret avses att placeras på ett tillräckligt stort djup för att säkerställa att frysning inte kan förväntas ske, bedöms termiska processer i avfallet och dess kollin vara av underordnad betydelse för förvarets långsiktiga säkerhet.

Följande termiska processer tas upp i detta kapitel:

- Värmetransport, avsnitt 21.2.6.

Hydrauliska processer

Vattenflödet genom avfallet bestäms av geometrin och vattengenomsläppligheten i de olika konstruktionsdelarna och komponenterna i förvaret, samt av tryckgradienten från det omgivande berget. Målsättningen att minimera flödet genom avfallet är av central betydelse för förvarets utformning och placering i berget. Som följd antas erosionen av de olika avfallsbehållarna vara försumbar i jämförelse med den kemiska degraderingen. Korrosion är ett exempel på en kemisk degraderingsprocess vilken kan generera gas och därmed påverka flödet genom avfallet. Höga övertryck av innesluten gas kan ge ett lokalt förhöjt vattentryck och kan därför bli en drivkraft för vattenflödet ut ur dessa inneslutningar. Andra samtidiga vatten- och gasflöden uppstår då avfallet vattenmätas efter avslutad drift.

Följande hydrauliska processer tas upp i detta kapitel:

- Vattenuptag och transport under omättade förhållanden, avsnitt 21.2.8.
- Vattentransport under mättade förhållanden, avsnitt 21.2.9.

Mekaniska processer

Avfall och avfallsbehållare i SFL kommer att utsättas för både intern och extern mekanisk påverkan, som kommer att ge upphov till mekaniska spänningar i materialen. Beroende på materialets mekaniska egenskaper kan dessa spänningar resultera i sprickor eller att materialet deformeras plastiskt. I SFL kan den betong som skulle kunna användas för i- och kringgjutning tjäna som ett exempel på det förstnämnda, medan de planerade stålbehållarna och hårdkomponenterna i avfallet snarare representerar den andra materialtypen. Bergutfall behandlas i avsnitt 22.2.10.

Följande mekaniska processer behandlas i detta kapitel:

- Sprickbildning, avsnitt 21.2.10.

Kemiska processer

Efter att SFL förslutits kommer en kemisk växelverkan mellan förvaret och grundvattnet i den kringliggande berggrunden att ske. Växelverkan kommer då att ske med avfall, avfallsbehållare, i- och kringgjutningsbruk och förvarskonstruktionen. Den kan innebära att grundvattnet eller däri lösta ämnen påverkar avfallet, avfallskollina samt de tekniska barriärerna, men även det omvända är möjligt.

Dessa kemiska processer kommer att leda till att egenskaperna hos avfallet och avfallsbehållarna förändras med tiden.

Följande kemiska processer tas upp i detta kapitel:

- Advektiv transport av lösta ämnen, avsnitt 21.2.11.
- Diffusiv transport av lösta ämnen, avsnitt 21.2.12.
- Sorption, avsnitt 21.2.13.
- Kolloidbildning och kolloidtransport, avsnitt 21.2.14.
- Upplösning, utfällning och omkristallisation, avsnitt 21.2.15.
- Kemisk degradering av organiska ämnen, avsnitt 21.2.16.
- Vattenuptag/svällning, avsnitt 21.2.17.
- Mikrobiella processer, avsnitt 21.2.18.
- Metallkorrosion, avsnitt 21.2.19.
- Gasbildning och gastransport, avsnitt 21.2.20.

Radionuklidtransport

Följande radionuklidtransportprocesser behandlas i detta kapitel:

- Speciering av radionuklider, avsnitt 21.2.21.
- Radionuklidtransport i vattenfas, avsnitt 21.2.22.
- Radionuklidtransport i gasfas, avsnitt 21.2.23.

21.2.2 Radioaktivt sönderfall

Processen radioaktivt sönderfall redovisades inte i Fud-program 2010 och SSM framförde inga synpunkter på det i sin granskning. SKB har inte genomfört några studier rörande radioaktivt sönderfall av långlivat låg- och medelaktivt avfall utöver det som redovisas i avsnitt 20.2.2 Radioaktivt sönderfall. Om nya uppgifter framkommer i samband med uppdateringen av referensinventariet för SFL, kan dock insatser inom området komma att behövas.

21.2.3 Stråldämpning och värmealstring

Den strålning som avges vid radioaktivt sönderfall kan interagera med avfallet och/eller andra material i förvaret. Den frigjorda energin överförs till de omgivande materialen i form av termisk energi och kommer därmed att släckas ut. Avfallet i det framtida SFL förväntas inte avge några betydande mängder värmealstrande strålning, varför processen bedöms som icke relevant för SFL.

Denna process redovisades inte i Fud-program 2010 och SSM framförde inga synpunkter på det i sin granskning. SKB har inte genomfört några studier rörande stråldämpning och värmealstring i långlivat låg- och medelaktivt avfall under den gångna perioden och ser i dag inget behov av ett sådant forskningsprogram. Om nya uppgifter framkommer i samband med uppdateringen av referensinventariet för SFL, kan denna ståndpunkt komma att omprövas.

21.2.4 Strålningsinducerad nedbrytning av organiskt material

Organiskt material i avfallet kan brytas ned genom påverkan av joniserande strålning och bilda nya kemiska species. I vilken omfattning detta sker är beroende av den aktuella strålningens typ och intensitet. I SFL kommer det att förekomma en viss mängd organiskt avfall i det historiska avfallet. Däremot förekommer i princip inget organiskt material i avfallet från kärnkraftverken.

I och med den låga strålningsintensiteten i det historiska avfallet bedöms denna process vara av liten betydelse för den långsiktiga säkerheten i SFL.

Denna process redovisades inte i Fud-program 2010 och SSM framförde inga synpunkter på det i sin granskning. SKB har inte genomfört några studier rörande strålningsinducerad nedbrytning av organiskt material i långlivat låg- och medelaktivt avfall under den gångna perioden och ser i dag inget behov av ett sådant forskningsprogram. Om ny information framkommer i samband med uppdateringen av referensinventariet för SFL, kan det dock bli aktuellt att omvärdera denna ståndpunkt.

21.2.5 Vattenradiolys

Det vatten som tränger in i SFL och avfallskollina kommer att påverkas av den joniserande strålningen. Detta bidrar till att vattenmolekyler exciteras och joniseras, vilket följs av brytningar av vattenmolekylernas kemiska bindningar. I SFL förväntas strålningsintensiteten vara så låg att radiolys av vatten inte bedöms ha någon signifikant påverkan på den långsiktiga säkerheten.

Denna process redovisades inte i Fud-program 2010 och SSM framförde inga synpunkter på det i sin granskning. SKB har inte genomfört några studier av vattenradiolys i förvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall under den senaste perioden och ser i dag inget behov av ett sådant forskningsprogram. Om ny information framkommer i samband med uppdateringen av referensinventariet för SFL, kan det dock bli aktuellt att omvärdera denna ståndpunkt.

21.2.6 Värmetransport

Värmetransporten mellan de olika komponenterna kan förväntas ske genom värmeledning som styrs av materialens värmeledningsförmåga och värmekapacitet. I allt väsentligt kommer förvarets och därmed avfallets temperatur att bestämmas av värmeutbytet med omgivande berg och grundvatten, medan avfallets inverkan på temperaturen kan betraktas som försumbar.

Denna process redovisades inte i Fud-program 2010 och SSM framförde inga synpunkter på det i sin granskning. SKB har inte bedrivit någon forskning rörande värmetransport i det långlivade låg- och medelaktiva avfallet under den gångna perioden och ser i dag inget behov av ett sådant forskningsprogram. Om ny information framkommer i samband med uppdateringen av referensinventariet för SFL, kan det dock bli aktuellt att omvärdera denna standpunkt.

21.2.7 Fasändring/frysning

Frysning av avfall och avfallsbehållare samt i- och kringgjutningsbruk kan ske i samband med att permafrost når förvarsdjup. I vilken omfattning frysning kommer att ske är direkt beroende av hur länge permafrostperioden varar och på vilket djup förvaret är placerat.

Effekten av en frysning är beroende av aktuell materialtyp. Exempelvis förväntas inte metaller i avfallet att påverkas direkt av en frysning, medan i- och kringgjutningsbruk liksom avfallsbehållare av betong skulle kunna frysa sönder på samma sätt som betongbarriärerna. Metallbehållare skulle dock kunna spräckas i samband med en frysning, om innehållet expanderar i tillräcklig omfattning.

Denna process redovisades inte i Fud-program 2010 och SSM framförde inga synpunkter på det i sin granskning. SKB har inte bedrivit någon forskning rörande fasändring/frysning av det långlivade låg- och medelaktiva avfallet under den gångna perioden. Däremot har ett par studier rörande frysning av betongbarriärer genomförts vilka redovisas i avsnitt 22.2.3 Fasändring/frysning. Då i- och kringgjutningsbruk kan förväntas påverkas på samma sätt som betong vid en frysning, kan dessa studier anses relevanta även inom detta område.

SKB ser i dag inget behov av ett separat forskningsprogram rörande fasändring/frysning av det långlivade låg- och medelaktiva avfallet och dess i- och kringgjutningsbruk, utan har för avsikt att samordna detta arbete med forskningen kring fasändring/frysning av betongbarriärerna, se avsnitt 22.2.3.

21.2.8 Vattenupptag och transport under omättade förhållanden

Under driftskedet hålls förvaret torrt genom dränagepumpning. Efter förslutning kommer grundvattnet att mätta sprickor och porer i berget nära förvaret. Grundvattnet fortsätter därefter fylla tomvolymerna i förvarssalarna och gradvis mätta olika konstruktionsmaterial och avfallspaket. När förvaret vattenfylls startar de transportprocesser som kan frigöra radionuklider.

SKB har i dagsläget inget program för forskning kring vattenupptag och transport under omättade förhållanden i SFL.

21.2.9 Vattentransport under mättade förhållanden

När förvaret mättats med vatten kommer den hydrauliska gradienten att driva vattenflödet genom avfallet. Flödets storlek bestäms av geometri och konduktivitet hos avfallspaketet och återfyllningsmaterialet. Även närvaron av hålrum eller sprickor i avfallet har en inverkan. Det som begränsar flödet genom avfallet är i första hand omgivande barriärer av betong och bentonit. Sett över lång tid kan flödet genom avfallet förändras, dels som följd av ändrat grundvattenflöde, dels genom successiv degradering av barriärer och avfall.

Detaljerade studier av vattenflödet genom avfallet är för närvarande inte planerade.

21.2.10 Sprickbildning

I SFL kan ett flertal olika processer leda till att det uppstår sprickor i avfall, avfallskollin och i- eller kringgjutningsbruk. I vilken mån ett material kan spricka styrs av dess egenskaper. Ett sprött material, som exempelvis betong har en större benägenhet att spricka under en pålagd last, än ett segare material såsom stål.

Av materialtyperna i SFL anses i- och kringgjutningsbruk samt betongkokillerna med historiskt avfall vara de som främst kan utsättas för sprickbildning, medan de planerade stålbehållarna och hårdkomponenterna förväntas vara betydligt mindre sprickbenägna. Det historiska avfallets benägenhet att spricka är i dagsläget inte möjligt att bedöma, då kännedomen om dess exakta sammansättning inte är tillräcklig.

Effekterna av sprickbildning i avfallet, dess behållare samt i- och kringgjutningsbruk är svåra att förutse. Processen som sådan bedöms dock som mindre kritisk för den långsiktiga säkerheten, då ingen säkerhetsfunktion ansätts avfallet eller dess behållare i den långsiktiga säkerhetsanalysen. Dessutom påverkas vattenflödet genom förvaret av en eventuell sprickbildning i de tekniska betongbarriärerna snarare än i avfallet och dess behållare.

Följande processer som kan leda till sprickbildning i avfallet, avfallsbehållare samt i- och kringgjutningsbruk tas upp:

- Fasändring/frysning, avsnitt 21.2.7.
- Gasbildning från kemisk degradering av organiska ämnen, avsnitt 21.2.16.
- Vattenupptag/svällning, avsnitt 21.2.17.
- Metallkorrosion, avsnitt 21.2.19.
- Gasbildning från metallkorrosion, avsnitt 21.2.20.

Sprickbildning i de tekniska betongbarriärerna behandlas i avsnitt 22.2.9.

Processen sprickbildning redovisades inte i Fud-program 2010 och SSM framförde inga synpunkter på det i sin granskning. SKB har inte bedrivit någon forskning rörande sprickbildning i det långlivade låg- och medelaktiva avfallet under den gångna perioden. Nyvunnen kunskap kring de processer som kan orsaka sprickbildning redovisas i de avsnitt som anges ovan.

SKB ser i dag inget behov av ett separat forskningsprogram rörande sprickbildning i det långlivade låg- och medelaktiva avfallet eller dess i- och kringgjutningsbruk. Forskningen rörande sprickbildning i cementbaserade material samordnas med forskningen kring sprickbildningen i betongbarriärerna och redovisas i avsnitt 22.2.9 Sprickbildning.

21.2.11 Advektiv transport av lösta ämnen

Advektiv transport av lösta ämnen i cementkonditionerat avfall hanteras på samma sätt som i betongbarriärer, se avsnitt 22.2.11 Advektion och blandning. För andra avfallsformer antas ingen transportbegränsning.

21.2.12 Diffusiv transport av lösta ämnen

Diffusiv transport av lösta ämnen i cementkonditionerat avfall hanteras på samma sätt som i betongbarriärer, se avsnitt 22.2.12 Diffusion. För andra avfallsformer antas ingen transportbegränsning.

21.2.13 Sorption

Sorption av radionuklider är en av de viktigaste fördröjande säkerhetsfunktionerna i SFL. Sorptionen förväntas ske på cement, se avsnitt 20.2.13 Sorption, men även på mineral i berggrunden. Cement kommer att vara ett vanligt förekommande material i SFL, varvid förståelsen kring sorption kan anses vara densamma som beskrivs i avsnitt 20.2.13.

21.2.14 Kolloidbildning och kolloidtransport

Ett flertal fysiska och geokemiska faktorer påverkar stabiliteten av kolloider, och som en följdverkan, deras transport. Kolloiders stabilitet i lösning definieras av vattenkemin. Mobilitet och retention i transport är kopplad till sprickornas fysikaliska egenskaper, där kolloider kan filtreras och bromsas upp i sprickfyllnadsmaterial och även genom att sorbera till mineralytor. Gradienten av vattenhastigheter, storleksfördelningen av porer hos medelstora ytor och porer påverkar den mekaniska filtreringen av kolloider i mediet (Ryan och Elimelech 1996). Därför kan kolloidfiltrering ske genom antingen mekaniska eller elektrostatiska processer. Se vidare i avsnitt 20.2.14 Kolloidbildning och kolloidtransport.

21.2.15 Upplösning, utfällning och omkristallisation

De kemiska och mekaniska egenskaperna hos cement och betong som används som i- och kringgjutningsbruk eller som lockgjutningsbruk på avfallskollina, kommer att förändras med tiden genom reaktioner med grundvattnet eller ämnen lösta i vattnet. Dessa ämnen kan antingen komma från det omgivande berget, från avfallet eller från andra avfallskollin.

Nedbrytning och upplösning av cement och betong i avfallet frigör joner och mobiliserar ämnen som blir tillgängliga för transport. Processer såsom vattentransport kan ändra vattensammansättningen och specieringen kommer att ändras när kemiska jämvikter ställer in sig. Detta kan leda till att ämnen lösta i vattnet faller ut och immobiliseras eller att lösligheten för ett ämne ökar.

Hur snabbt upplösningen sker beror på avfallets materialsammansättning, se avsnitt 21.1.8 Vattenupptag och transport under omättade förhållanden, samt hur det är konditionerat och inneslutet. Kemisk degradering av organiska ämnen beskrivs i avsnitt 21.2.16 Kemisk degradering av organiska ämnen och metallkorrosion i avsnitt 21.2.19 Metallkorrosion.

Reaktioner mellan upplösta ämnen och cementbaserade material i kollin och bruk kan även leda till att porer och mindre sprickor sätts igen. Detta kan i sin tur leda till att gaser inte kan ledas ut ur förvaret på ett kontrollerat sätt. Denna process behandlas i avsnitt 22.2.15 Upplösning, utfällning och omkristallisation.

I Fud-program 2010 redovisades denna process endast översiktligt i kapitlet Hantering av långlivat låg- och medelaktivt avfall och SSM framförde inga synpunkter på det i sin granskning. SKB har inte bedrivit någon forskning inom området under den gångna perioden. Detta arbete har i stället samordnats med motsvarande studier av betongbarriärerna och redovisas i avsnitt 22.2.15 Upplösning, utfällning och omkristallisation.

SKB ser i dag inget behov av ett separat forskningsprogram inom området, utan samordnar även fortsättningsvis denna forskning med motsvarande studier av betongbarriärerna.

21.2.16 Kemisk degradering av organiska ämnen

Kemisk degradering av organiska ämnen och material i avfallet eller dess matris kan generera produkter som påverkar förvarets långsiktiga säkerhet. Bildandet av produkter som har en komplexbildande förmåga kan under vissa omständigheter påverka sorptionen och därmed radionuklidtransporten. Olika radionuklider kommer att påverkas i olika utsträckning. Vilka radionuklider som bildar lösliga komplex med organiska komplexbildare påverkas i stor grad av radionuklidens oxidationstal och om det bildade metallorganiska komplexet är starkare än det hydroxidkomplex som bildas när den organiska komplexbildaren är frånvarande. En viktig mekanism för nedbrytandet av organiska ämnen och material i avfallet är hydrolys vid de höga pH-värdena som genereras i cementporvattnet.

Kemisk degradering av organiska ämnen kan även resultera i produktion av gas, vilket kan leda till uppbyggnad av ett gastryck inuti konstruktionerna. Det kan även leda till att radionuklider släpps ut som små gasformiga molekyler. En ytterligare möjlighet är att bildad koldioxid påskyndar karbonatiseringen av cementbaserade material, såsom kringgjutningsbruk eller avfallskollin.

Enligt referensinventariet från 1998 (Lindgren et al. 1998) är mängden organiskt material i SFL begränsad och härrör främst från det historiska avfallet. Därmed görs bedömningen att denna process inte kommer att ha någon avgörande betydelse för den långsiktiga säkerheten för SFL.

Denna process redovisades inte i Fud-program 2010 och SSM framförde inga synpunkter på det i sin granskning. SKB har inte bedrivit någon forskning kring kemisk degradering av organiska ämnen i det långlivade låg- och medelaktiva avfallet under den senaste perioden. SKB ser i dag inget behov av ett separat forskningsprogram inom området, utan har valt att samordna detta med forskningen rörande kemisk degradering av organiska ämnen i det kortlivade avfallet, se avsnitt 20.2.16.

Om nya uppgifter framkommer i samband med uppdateringen av referensinventariet för SFL rörande innehållet av organsikt material i det historiska avfallet kan dock denna ståndpunkt komma att omvärderas.

21.2.17 Vattenupptag/svällning

Efter förslutning och återmättnad av förvaret kommer avfallet att stå i ständig kontakt med vatten, vilket innebär att olika processer kan komma att påverka avfallet.

Förändringar av avfallets kemiska och/eller mekaniska egenskaper kan leda till att avfallet expanderar eller kontraherar. Av dessa bedöms inte kontraktion ha någon inverkan på förvarets långsiktiga egenskaper, medan däremot expansion kan leda till höga mekaniska spänningar och eventuellt även till sprickbildning i avfallsbehållarna.

I SFL kommer huvuddelen av avfallet att utgöras av metaller, medan mängden organiskt avfall förväntas vara begränsad. Expansion av avfallet i SFL bedöms därför främst att vara orsakad av metallkorrosion, se avsnitt 21.2.19.

I avfallskollin där det förekommer stora mängder fritt vatten eller vatten bundet i igjutningsbruk kan frysning leda till expansion och därmed höga spänningar i behållaren, se avsnitt 21.2.7 Fasändring/frysning. I och med målsättningen att placera förvaret på ett djup som är frostfritt även under en permafrost, görs bedömningen att denna process inte kommer att ha någon negativ inverkan på förvarets långsiktiga säkerhet.

Denna process redovisades inte i Fud-program 2010 och SSM framförde inga synpunkter på det i sin granskning. SKB har inte bedrivit någon forskning rörande vattenupptag/svällning av det långlivade låg- och medelaktiva avfallet under den senaste perioden och ser i dag inget behov av ett separat forskningsprogram inom området. Då bedömningen är att den svällning som kan komma i fråga främst är kopplad till metallkorrosion hänvisas till forskningsprogrammet för detta, se avsnitt 21.2.19. Om nya uppgifter framkommer i samband med uppdateringen av referensinventariet för SFL rörande innehållet av organiskt svällbart material i det historiska avfallet kan dock denna ståndpunkt komma att omvärderas.

21.2.18 Mikrobiella processer

För det långlivade låg- och medelaktiva avfallet i form av inducerat stål bedöms mikrobiella processer inte ha någon avgörande betydelse.

Denna process redovisades inte i Fud-program 2010 och SSM framförde inga synpunkter på det i sin granskning. SKB har inte bedrivit någon forskning rörande mikrobiella processer i det långlivade låg- och medelaktiva avfallet under den senaste perioden och ser i dag inget behov av ett separat forskningsprogram inom området. Om nya uppgifter framkommer i samband med uppdateringen av referensinventariet för SFL rörande innehållet av organiskt material i det historiska avfallet, kan dock denna ståndpunkt komma att omvärderas och ett separat forskningsprogram att formuleras.

21.2.19 Metallkorrosion

SFL kommer vid förslutning att innehålla en stor mängd metaller av olika slag, främst i form av hårdkomponenter av stål, men även i form av avfallsbehållare. Om förvaret kommer att innehålla betongkonstruktioner, bör utgångspunkten i frågor rörande metallkorrosion vara att armeringsjärn kommer att användas.

Hastigheten med vilken stål korroderar har stor inverkan på förvarets långsiktiga säkerhet i och med att frigörelsehastigheten för inducerad aktivitet i det metalliska avfallet är direkt kopplad till korrosionshastigheten. Den anaeroba korrosionsprocessen ger även upphov till bildandet av vätgas. En hög korrosionshastighet ger en hög gasbildningshastighet, som kan leda till att det byggs upp ett gastryck inne i förvarskonstruktionerna. Om gasbildningshastigheten är låg finns däremot möjligheten för den bildade gasen att sakta diffundera ut genom förvarskonstruktionerna, se även avsnitt 22.2.19 Gasproduktion.

Då miljön i SFL sannolikt kommer att likna den i SFR med avseende på pH, Eh och vattensammansättning, kan de processer som sker i SFR även förväntas ske i SFL.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 presenterades forskningen kring metallkorrosion av det långlivade låg- och medelaktiva avfallet endast översiktligt och i stället hänvisades till forskningen rörande metallkorrosion i det kortlivade avfallet. SSM ansåg sig i sin granskning inte se en tydlig bild av vad programmet för korrosion och gasbildning till följd av korrosion i det långlivade avfallet, kommer att innehålla och förväntar sig en förbättring i detta avseende i Fud-program 2013. SSM framförde även att centrala frågor för SFL är behovet av kunskap om korrosion av metaller och konsekvenserna av gasbildning till följd av korrosionen.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

SKB har sedan Fud-program 2010 uppdaterat kunskapen rörande korrosion av metaller, främst järn och stål, i slutförvarsmiljö. I detta arbete har det framkommit att de korrosionshastigheter som tidigare antagits gällande för en alkalisk syrefri slutförvarsmiljö sannolikt har varit betydligt överskattade, se avsnitt 20.2.19 Metallkorrosion.

Dessa nya data får konsekvenser även för SFL eftersom miljön i detta förvar, och då särskilt den förvarsdel där den största andelen metaller kommer att placeras, sannolikt kommer att kännetecknas av högt pH och minimal tillgång till syre. Med en låg korrosionshastighet blir även gasbildningshastigheten låg och möjligheten att transportera bort den bildade gasen på ett kontrollerat sätt ökar därmed.

Program

SKB har för avsikt att samordna forskningen kring metallkorrosion av det långlivade låg- och medelaktiva avfallet och de därmed förknippade konsekvenserna, med forskningen rörande metallkorrosion av det kortlivade låg- och medelaktiva avfallet även under den kommande perioden. SKB:s program för forskning kring korrosion redovisas i avsnitt 20.2.19 Metallkorrosion. Programmet för forskning kring effekter av gasproduktion på de tekniska betongbarriärerna redovisas i avsnitt 22.2.19 Gasproduktion.

21.2.20 Gasbildning och gastransport

Av de processer som kan tänkas bidra till gasbildningen i det långlivade avfallet bedöms metallkorrosionen stå för det mest betydande bidraget, se avsnitt 21.2.19. Detta beror på att en stor del av avfallet utgörs av hårdkomponenter och interndelar i stål och rostfritt stål. I långlivat avfall från de svenska kärnforskningsprogrammen samt i långlivat ickekärntekniskt avfall förekommer även organiskt material, varför även mikrobiell nedbrytning av dessa kan ge upphov till gasbildning.

Gastransporten genom det långlivade avfallet i ett framtida SFL bestäms utifrån hur avfallet konditioneras, val av avfallsbehållare samt huruvida i- och kringgjutningsbruk används.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Denna process beskrevs inte i Fud-program 2010. SSM framförde i sin granskning att metallkorrosion och konsekvenserna av gasbildningen till följd av denna är en central fråga för SFL.

Program

SKB har inte genomfört någon forskning rörande gasbildning och gastransport i långlivat avfall under den senaste perioden utöver det som redovisas i avsnitt 21.2.20. I dag finns inget behov av ett separat forskningsprogram rörande gasbildning och gastransport i långlivat avfall. Som resultat av kommande säkerhetsvärdering för SFL kan dock ett specifikt program komma att formuleras.

21.2.21 Speciering av radionuklider

I SFL kommer från avfallet frigjorda radionuklider att förekomma i form av olika kemiska species i lösning. Exakt i vilken form varje enskild radionuklid förekommer styrs av den omgivande miljön där främst pH, Eh samt oxidationstal har stor inverkan. I dag finns inget färdigt förvarskoncept för SFL, men sannolikt kommer cement och betong att utgöra viktiga komponenter. Därutöver kommer stål att finnas i form av både avfallsbehållare och avfall och även i form av armeringsjärn i betongkonstruktionerna. Detta innebär att miljön i SFL sannolikt kommer att likna den i SFR efter förslutning och specieringen av radionuklider kommer därför likna den i SFR, se avsnitt 20.2.21 Speciering av radionuklider. Det bör dock beaktas att radionuklidinventariet i SFL kommer att skilja sig från det i SFR och att kunskap i nuläget inte finns sammanställd kring specieringen av radionuklider i SFL.

Denna process beskrevs inte i Fud-program 2010 och SSM framförde inga kommentarer i sin granskning. SKB har under den senaste perioden inte genomfört några studier rörande speciering av radionuklider i det långlivade låg- och medelaktiva avfallet. Vissa studier rörande speciering av radionuklider i det kortlivade avfallet är dock relevanta även för det långlivade avfallet, se avsnitt 20.2.21 Speciering av radionuklider.

I dagsläget har inte SKB något konkret program för forskning kring speciering av radionuklider i det långlivade avfallet. I takt med att referensinventariet konkretiseras och fler detaljer kring val av barriärmaterial i förvaret bestäms, kan dock ett separat forskningsprogram för speciering av det långlivade avfallet bli nödvändigt.

21.2.22 Radionuklidtransport i vattenfas

Hantering av radionuklidtransport i vattenfas finns presenterad i avsnitt 20.2.22.

21.2.23 Radionuklidtransport i gasfas

Hantering av radionuklidtransport i gasfas finns presenterad i avsnitt 20.2.23.

22 Betongbarriärer

I detta kapitel beskrivs den naturvetenskapliga forskningen som SKB planerar att genomföra för att öka förståelsen kring hur funktionen hos de tekniska barriärerna av betong i slutförvar för låg- och medelaktivt avfall förändras under de tidsperioder som säkerhetsanalyserna för de olika förvarerna behandlar. Den forskning som SKB bedriver för att öka förståelsen av andra barriär- och återfyllningsmaterial som används för låg- och medelaktivt avfall presenteras i kapitel 25 Buffert och återfyllning.

I slutförvar för låg- och medelaktivt avfall förekommer betongbarriärer som golv, väggar och lock i de barriärsystem som omsluter avfallet. I betongbarriärerna finns i vissa fall olika metalldelar som armeringsjärn och formstag. Exempel på hur betongbarriären kan se ut finns i figur 22-1.

De tekniska barriärerna av betong har till uppgift att begränsa och fördröja utsläppet av radionuklider. Betongbarriärerna tillskrivs därför säkerhetsfunktionerna Begränsad advektiv transport och God sorption, se SAR-08. För att utvärdera den långsiktiga säkerheten är olika indikatorer kopplade till säkerhetsfunktionerna. Indikatorernas tillstånd används i analysen av SFR:s långsiktiga säkerhet för att utvärdera om säkerhetsfunktionen upprätthålls.

För säkerhetsfunktionen Begränsad advektiv transport utgörs säkerhetsfunktionsindikatorerna av Hydraulisk konduktivitet och Temperatur. För säkerhetsfunktionen God sorption utgörs säkerhetsfunktionsindikatorerna av Högt pH, Reducerande förhållanden, Låga halter komplexbildare och Tillgänglig sorptionsyta.

Betongens diffusionsegenskaper har också betydelse för att begränsa och fördröja utsläppet av radionuklider. Betongen har även stor inverkan på den kemiska miljön i barriärerna och avfallet.

Pluggar är en typ av teknisk konstruktion installerade i tunnlar som leder till förvarsutrymmena och syftar till att begränsa vattenflödet. Även pluggarna består delvis av betong. Betong förekommer också som kringgjutningsbruk kring avfallet.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 beskrev SKB inledande hur forskningen kring betongbarriärerna är organiserad och att den bygger på en processbaserad metodik.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Inom SR-PSU tas en rapport fram som behandlar processer relaterade till de tekniska barriärerna i SFR. I rapporten ingår processbeskrivningar för betongbarriärerna och de processer som har identifierats som relevanta för den långsiktiga säkerheten för SFR.



Figur 22-1. Borrkärna uttagen ur betongbarriären i bergssal för medelaktivt avfall i SFR. På bilden kan man urskilja ballastkornen, cementmatrisen och luftporer.

Program

Den aktuella bedömningen av behovet av forskning kring betongbarriärer redovisas i detta kapitel. Slutsatserna från säkerhetsanalysen för det utbyggda SFR, SR-PSU, kan komma att ha stor inverkan på programmets inriktning och omfattning.

22.1 Initialtillståndet hos betongbarriärer

Initialtillståndet för betongbarriärer definieras som det tillstånd som råder i barriärerna vid förslutning. I samband med förslutningen kommer förvarets dränagepumpning att upphöra och förvaret kommer att vattenfyllas.

Betongbarriärernas egenskaper vid förslutning beror på teknikbeslut gällande konstruktion av nya barriärer samt underhåll av befintliga barriärer, vilket beskrivs i kapitel 8 Teknikutveckling för låg- och medelaktivt avfall. Barriärernas egenskaper påverkas även av den miljö som råder i förvaret under drifttiden och eventuell kringgjutning av avfallet. Detta regleras av drift- och deponeringsrutiner.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 beskrevs forskningsprogrammen för de olika variabelernas initialtillstånd under varje enskild variabel.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

Inom SR-PSU görs vissa antaganden rörande barriärernas egenskaper vid förslutning. Dessa antaganden grundas på det förväntade resultatet av de teknikbeslut som beskrivs i kapitel 8 Teknikutveckling för låg- och medelaktivt avfall.

Program

Forskningsprogrammen för de olika variabelernas initialtillstånd beskrivs under varje enskild variabel.

22.1.1 Variabler

Initialtillståndet för betongbarriärer beskrivs av ett antal variabler. En översikt av dessa samt hänvisningar till respektive avsnitt där varje enskild variabel beskrivs, återfinns i tabell 22-1.

Tabell 22-1. Variabler för beskrivning av initialtillståndet.

Variabel	Definition	Avsnitt
Geometri	Volym och dimensioner. Porositet och porstruktur hos barriärerna.	22.1.2
Temperatur	Temperatur.	22.1.3
Hydrovariabler	Storlek, riktning och fördelning av vattenflöde. Vattenmättnad, vattenflöden och vattentryck. Vattnets aggregationstillstånd (vatten eller is).	22.1.4
Mekaniska spänningar	Spänningar och töjningar i barriärerna.	22.1.5
Materialsammansättning	Mängder, sammansättning och ytegenskaper hos material i barriärer. Typ och mängd av kemikalier. Typ och mängd av organiska material och komponenter som kan användas av mikrober som näringsämnen och energikällor.	22.1.6
Vattensammansättning	Sammansättning hos vatten (inklusive radionuklider). Redox, pH, jonstyrka, koncentration av lösta specier, typ och mängd av kolloider och/eller partiklar, mängden och sammansättningen av löst gas. Densitet och viskositet.	22.1.7
Gasvariabler	Mängder, sammansättning, volym, tryck och mättnadsgrad. Storlek, riktning och fördelning av gasflöde.	22.1.8

22.1.2 Geometri

De tekniska barriärernas geometri bestäms utifrån förvarets utformning samt av de yttermått som finns specificerade i respektive typbeskrivning av de betongtankar som tillgodoräknas som tekniska barriärer. Utformningen beror på hur förvaret konstruerades vid uppförandet och eventuella underhållsåtgärder före förslutning.

För betong är sprickfördelning och sprickgeometri viktiga geometriparametrar. Före förslutning kan sprickor ha uppkommit på grund av volymförändringar under härdning, torkning och återfuktning samt armeringskorrosion.

Porstrukturen hos cementbaserade material såsom betong samt i- och kringgjutningsbruk innefattar gelporer, kapillärporer och luftporer i stigande storleksordning. Vilken porstruktur som eftersträvas hos ett specifikt material är helt avhängigt av materialets önskade egenskaper. Som exempel kan nämnas att det kringgjutningsbruk som används i silon är utformat för att ha en öppen porstruktur, för att möjliggöra en effektiv gastransport ut ur förvaret. Den konstruktionsbetong som används i de tekniska barriärerna är däremot utformad för att vara så tät som möjlig, för att säkerställa att transport av radionuklider genom denna endast kan ske genom diffusion i ett stillastående medium.

I samband med att betongen åldras förändras porstrukturen. Detta kan innebära att porerna växer till på grund av urlakning eller att de sätts igen genom mineralutfällningar. Processer som påverkar porgeometrin behandlas i avsnitt 22.2.15 Upplösning, utfällning och omkristallisation. De flesta processer som skulle kunna leda till en förändrad porgeometri, är dock så långsamma att de inte påverkar betongens initialtillstånd. Av särskilt intresse är därför den karbonatisering och möjliga förtätning av betongens ytskikt som kan ske under driftperioden och som omvandlar portlandit till kalciumkarbonat genom en reaktion med tillgänglig koldioxid eller karbonatjoner.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SKB bedömde att mer forskning krävdes gällande tomrummets och återfyllningens inverkan på hydrovariabler.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2010

Undersökningsprogrammet för att bedöma statusen hos betongkonstruktionerna i SFR beskrivs i kapitel 8 Teknikutveckling för slutförvaring av låg- och medelaktivt avfall. Delar av forskningsprogrammet som beskrivs i avsnitt 20.1.2 Geometri hos avfallet, gäller även geometrin hos barriärerna.

Program

SKB genomför i dagsläget studier kopplade till det kringgjutningsbruk som används i silon i SFR. Arbetet fokuserar i dag främst på tekniska aspekter som tillverkningsmetod och metoder för utvärdering av de hydrauliska egenskaperna i kringgjutningsbruket. Syftet med dessa studier är att erhålla ett mer homogent bruk vars egenskaper vid initialtillståndet ska vara lätta att bestämma.

SKB planerar även i dagsläget för att låta genomföra en enklare studie av porstrukturen i betongen i bergssal för medelaktivt avfall, BMA.

22.1.3 Temperatur

Den initiala temperaturen i förvaret sätts framför allt av det omgivande bergets temperatur, eftersom låg- och medelaktivt avfall alstrar mycket små mängder värmeenergi till följd av stråldämpning.

22.1.4 Hydrovariabler

Hydrovariablerna omfattar vattenmättnad, vattentryck, och vattenflöden i betongbarriärerna. Även vattnets aggregerationstillstånd beaktas.

Randvillkoren som styr vattenflödet genom betongbarriärerna ges av det omgivande tryckfältet. Detta fält beror på förvarets layout och placering i berget, bergets hydrogeologiska egenskaper,

egenskaperna hos återfyllningsmaterialet i förvarssalarna samt på de yttre randvillkor som gäller för flödesmodellen. Den lokala flödesbilden påverkas vidare av storlek, form och materialegenskaper hos betongbarriärerna. Vattenflöden förekommer inte vid deponering, eftersom förvaret dränagepumpas under driftskedet. När dränagepumpningen upphör kommer förvaret att vattenfyllas. Dock är vattenmättnaden vid förslutning initialt låg i barriärerna. Viss mängd vatten kan förekomma initialt via inträngning från vattenförande sprickor i berget och vattenhalten i de olika förvarsdelarna är beroende av kontakten med det omgivande berget. Vattenhalten inverkar på de kemiska processerna i förvaret som till exempel armeringsjärns korrosionsbenägenhet. Betongbarriärerna kommer med tiden att bli vattenmättade efter förslutningen, efter att dränagepumpningen upphört. En hydrogeologisk modell har använts för att beräkna hur lång tid det tar att fylla och mätta förvaret med grundvatten (Holmén och Stigsson 2001.). Beräkningarna visar att tomrummet (porositeten) som finns inuti silon mätts sist och att detta kan ta 25 år. Tiden det tar att fullständigt mätta BMA, BLA och BTF (se kapitel 4, figur 4-1 angående förvarsdelar i SFR) är endast några få år.

22.1.5 Mekaniska spänningar

Mekaniska spänningar förekommer i olika omfattning i alla typer av konstruktioner. I betongkonstruktioner uppkommer både tryck- och dragspänningar som en följd av olika processer och laster. Golvet i en förvarssal utsätts för trycklaster från avfall, kringgjutningsbruk och återfyllning. Väggar belastas med sidokrafter, vilket resulterar i tryckspänningar på ena sidan och dragspänningar på den andra. Dessa sidokrafter kan exempelvis härröra från ett inre gastryck orsakat av gasproduktion, se avsnitt 22.2.19 Gasproduktion, och från svällande avfall genom vattenupptag/svällning, se avsnitt 20.2.17 Vattenupptag/svällning, samt slutligen från yttre laster från återfyllning eller grundvattentryck.

Korrosion av armeringsjärn i betongkonstruktioner kan även leda till betydande lokala dragspänningar i materialet genom att korrosionsprodukterna tar upp större volym än den rena metallen, se avsnitt 22.2.18 Metallkorrosion. Dragspänningar kan även uppstå vid uppförandet av konstruktionerna när betongen hydratiserar, det vill säga hårdnar.

Slutligen kan bergutfall leda till mycket stora påfrestningar främst på locket av förvars-konstruktionerna, se avsnitt 22.2.10 Bergutfall.

Av de processer som nämns ovan bedöms initialtillståndet främst påverkas av tryck från avfall på förvarets bottenplatta samt tryck på övriga konstruktionsdelar från återfyllningsmaterial och det hydrostatiska vattentrycket i samband med återmättnad efter förslutning. Korrosion av främst armering under driftperioden kan leda till lokal spjälkning av täcksikt, men då detta kan åtgärdas före förslutning bedöms dess inverkan på initialtillståndet vara begränsad.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 beskrevs detta område endast översiktligt i kapitlet Tekniska barriärer i SFR. I programmet hänvisades till det då planerade undersökningsprogrammet för tillståndet hos betongkonstruktionerna i SFR, vars syfte var att kartlägga statusen hos de tekniska barriärerna och övriga installationer efter drygt 20 års drift. De synpunkter som SSM framförde i sin granskning redovisas i respektive avsnitt för de ovan angivna processerna som kan orsaka mekaniska spänningar.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

Under åren 2010 och 2011 genomfördes en statusbedömning av betongkonstruktionerna i SFR. Vid undersökningarna påvisades lokal armeringskorrosion, vilket hade resulterat i att betongens täcksikt, det vill säga det betongskikt som ligger utanför den yttersta armeringen, lokalt spjälkats bort. Betongen uppvisade även lokalt förhöjda kloridhalter, som orsakats av inläckande grundvatten. Detta läckage har antagligen påskyndat armeringskorrosionen. Under detta arbete noterades även genomgående sprickor i betongkonstruktionen, vilka sannolikt uppkommit redan i samband med uppförandet av konstruktionerna i och med den krympning som sker när betongen hydratiseras. Se vidare avsnitt 8.1 Slutförvar för kortlivat låg- och medelaktivt avfall.

Program

I syfte att säkerställa initialtillståndet för SFR håller SKB i dagsläget på att utforma ett program för reparationsåtgärder av de skador som upptäckts på betongkonstruktionerna, se avsnitt 8.1.

De erfarenheter som dragits i samband med statusbedömningen av betongkonstruktionerna tas även tillvara vid konstruktion och uppförande av de nya betongkonstruktionerna i utbyggnaden av SFR, liksom vid utformningen av betongkonstruktioner i det framtida SFL. Av de fokusområden som identifierats för framtida anläggningar kan nämnas val av betongrecept, metod för uppförande, tjocklek på betongens täcksikt samt kontroll av klimatet i förvaret under driftperioden.

22.1.6 Materialsammansättning

Betong utgörs av en blandning av cement och ballast i form av sand, grus och krossat berg där cementet utgör det sammanhållande materialet. Utöver detta tillsätts vatten och i förekommande fall även tillsatsmedel såsom flytmedel, vattenreducerande medel eller skumdämpare. Betongens egenskaper påverkas av mängden cement och ballast men även av vattencementtalet, vct, vilket anger hur mycket vatten i förhållande till cement som använts vid tillredningen av betongen.

I slutförvar för låg- och medelaktivt avfall kan olika sorters cementbaserade material användas, bland annat i form av betong i anläggningskonstruktioner eller som i- eller kringgjutningsbruk. Den valda sammansättningen på dessa material är beroende av önskade egenskaper, men i grunden är det ingen skillnad på de ingående huvudkomponenterna cement och ballast. Den huvudsakliga skillnaden mellan olika cementbaserade material ligger i stället i valet av vattencementtal samt typ och mängd av olika tillsatsmedel.

Betongens kemiska sammansättning påverkas endast i liten omfattning under drifttiden. De huvudsakliga processerna är dels den under lång tid pågående hydratiseringen, dels den karbonatisering av portlanditen i betongens ytskikt som sker genom reaktion med tillgänglig koldioxid. Utöver detta kan en viss förändring av materialets sammansättning ske genom interaktioner med inträngande grundvatten.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 redovisades betongens sammansättning endast översiktligt. SSM framförde i sin granskning inga synpunkter på detta.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2010

Som en del i det undersökningsprogram som genomförts rörande status hos betongkonstruktionerna i BMA i SFR, har ett antal analyser genomförts för att klarlägga kloridhalten i betongen samt betongens innehåll av karbonat. Utöver detta har även mätningar av pH i betongen genomförts i ett försök att bestämma nuvarande karbonatiseringsdjup.

Dessa studier har visat att den totala karbonathalten i betongen är $6,5 \pm 0,2$ viktsprocent kalciumkarbonat per kilo betong, men att endast en mycket begränsad karbonatisering av portlanditen i ytskiktet kunde påvisas. Mätningar av kloridhalten i betongen visade på förhöjda halter i de yttersta 100 millimetrarna, något som kan härledas till att inträngande kloridhaltigt grundvatten ansamlats på betongkonstruktionerna.

Program

SKB planerar för ytterligare undersökningar av mineralsammansättningen och strukturen hos betongen i BMA. Syftet med dessa studier är att erhålla ett mer komplett underlag till arbetet med att bestämma betongkonstruktionernas initialtillstånd. Dessa undersökningar kan sedan även tjäna som underlag vid framtagning av recept och utformning av konstruktionslösningar för framtida förvar.

22.1.7 Vattensammansättning

Sammanställningen av och pH i det vatten som är inneslutet i betongens porer, porvattnet, påverkas av den kemiska omgivningen, alltså mineraler i betongen samt grundvattnet i den kringliggande berggrunden. Initialt styrs dessa egenskaper helt av betongens sammansättning och vid förslutning kan det förväntas att porvattnet i betongen kännetecknas av det höga pH-värde och den sammansättning som är karakteristisk för en hårdnad betong.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 redovisades betongens vattensammansättning endast översiktligt och ett program för provtagning av betongen i BMA presenterades. Ett av syftena med detta provtagningsprogram var att mäta kloridhalten i betongen på vissa utvalda platser i konstruktionen. SSM framförde i sin granskning inga synpunkter på detta.

Nyvännen kunskap sedan Fud 2010

Sedan Fud-program 2010 har SKB genomfört provtagningar av betongen i främst BMA och bland annat mätt kloridhalt, pH och relativ fuktighet i betongen. Undersökningarna visade på förhöjda kloridhalter ner till cirka 100 millimeter samt i något fall sänkt pH i ytskiktet vilket tyder på begynnande karbonatisering.

Program

SKB kommer under den kommande perioden att fortsätta att utvärdera resultaten från de genomförda undersökningarna samt utreda vilka åtgärder som eventuellt kan behöva vidtas.

22.1.8 Gasvariabler

Gasvariablerna utgörs av mängd, sammansättning, volym, partialtryck, mättnadsgrad samt storlek och riktning på gasflöden. Initialt förekommer inga gaser i betongkonstruktionerna utan de uppkommer först i samband med nedbrytning av det deponerade avfallet och korrosion av ingjuten armering.

SKB har i dagsläget inget program rörande fastställning av gassammansättning och gasflöden vid initialtillståndet i betongbarriärerna. För program rörande forskning kring gasbildningsprocesser som kan påverka den långsiktiga säkerheten hänvisas till avsnitt 22.2.19 Gasproduktion.

22.2 Processer

En rad processer kommer med tiden att förändra tillståndet hos betongbarriärerna och deras hålrum. Vissa processer sker under alla förhållanden, medan andra bara är möjliga under speciella betingelser.

I detta avsnitt beskrivs de processer som kan förväntas påverka betongbarriärerna under hela förvarets livstid. Beskrivningen omfattar både SFR och SFL, eftersom majoriteten av de processer som förväntas ske i dessa kan anses vara oberoende av förvarstyp. I de fall en specifik process skiljer sig betydligt mellan de båda förvaren behandlas denna förvarsspecifikt.

22.2.1 Översikt av processer

De processer som påverkar förhållandena i betongbarriärerna kan delas in i fem olika huvudklasser: termiska processer, hydrauliska processer, mekaniska processer och kemiska processer samt radionuklidtransport. Under varje huvudklass kan ett antal olika processer förekomma och växelverka med varandra eller med andra processer.

Termiska processer

Det låg- och medelaktiva avfallets inverkan på temperaturen i förvaret är under normala betingelser försumbar. Denna bedömning grundar sig i vetenskapen om att de värmealstrande processerna i det låg- och medelaktiva avfallet, såsom radioaktivt sönderfall (avsnitt 20.2.2 och 21.2.2) och stråldämpning och värmealstring (avsnitt 20.2.3 och 21.2.3) är mycket begränsade. Förvarets temperatur kommer därför att bestämmas av det omgivande bergets temperatur.

Så länge som temperaturen ligger över fryspunkten för betongporvattnet är temperaturens inverkan på betongbarriärernas egenskaper försumbar. Däremot innebär frysning av betongen i samband med att en permafrost når förvarsdjup, att betongen spricker och att dess förmåga att fördröja radionuklidtransport ut ur förvaret försämras (Emborg et al. 2007).

Följande termiska processer behandlas:

- Värmetransport, avsnitt 22.2.2.
- Fasändring/frysning, avsnitt 22.2.3.

Hydrauliska processer

Vattenflödet genom förvaret bestäms av vattengenomsläppligheten i de olika komponenterna i förvaret och av den hydrauliska gradienten. Om det samtidigt förekommer gas uppstår ett tvåfasflöde där både vattenflödet och gasflödet påverkas av den relativa mättnadsgraden av respektive fas. Storleken på vattenflödet i förvaret bestäms i hög grad av det omgivande grundvattenflödet. Grundvattenflödet förändras långsamt över tiden, som en funktion av till exempel landhöjning och klimatutveckling.

Följande hydrauliska processer behandlas:

- Vattenuptag och -transport under omättade förhållanden, avsnitt 22.2.4.
- Vattentransport under mättade förhållanden, avsnitt 22.2.5.
- Gastransport och vattenlöslighet, avsnitt 22.2.6.

Mekaniska processer

Betongbarriärerna kommer under förvarets livstid att utsättas för både intern och extern mekanisk påverkan vilket kommer att ge upphov till mekaniska spänningar. Så länge som gränserna för betongens hållfasthet inte överskrids kommer dessa processer inte att ha en negativ inverkan på dess kvarhållande förmåga. Om dessa gränser överskrids kan däremot sprickor uppkomma i betongen och dess förmåga att begränsa utsläpp av radionuklider att påverkas.

Följande mekaniska processer behandlas:

- Tryck från svällande avfall, avsnitt 22.2.7.
- Tryck från bentonit, avsnitt 22.2.8.
- Sprickbildning, avsnitt 22.2.9.
- Bergutfall, avsnitt 22.2.10.

Kemiska processer

Under förvarets livstid kommer betongbarriärernas egenskaper att påverkas av kemiska interaktioner med omgivande grundvatten eller ämnen lösta i grundvattnet. Betongens egenskaper kan även påverkas av att avfallet förändras genom likartade kemiska reaktioner, se avsnitt 20.2 och 21.2.

Vissa processer påverkar direkt och konkret betongbarriärernas egenskaper genom att de orsakar sprickbildning och öppnar upp flödesvägar. Andra processer påverkar betongbarriärernas förmåga att kemiskt hålla kvar radionukliderna, genom att skapa komplexbildare eller förändra porvattensammansättningen i betongen.

Följande kemiska processer behandlas:

- Advektion och blandning, avsnitt 22.2.11.
- Diffusion, avsnitt 22.2.12.
- Sorption, avsnitt 22.2.13.
- Kolloidtransport och filtrering, avsnitt 22.2.14.
- Upplösning, utfällning och omkristallisation, avsnitt 22.2.15.
- Porvattenspeciering och betonginteraktioner, avsnitt 22.2.16.
- Mikrobiella processer, avsnitt 22.2.17.
- Metallkorrosion, avsnitt 22.2.18.
- Gasproduktion, avsnitt 22.2.19.

Radionuklidtransport

Följande radionuklidtransportprocesser behandlas i detta kapitel:

- Speciering av radionuklider, avsnitt 22.2.20.
- Radionuklidtransport i vattenfas, avsnitt 22.2.21
- Radionuklidtransport i gasfas, avsnitt 22.2.22.

22.2.2 Värmetransport

Under normala betingelser bestäms förvarets temperatur av det omgivande bergets temperatur medan det låg- och medelaktiva avfallets inverkan på temperaturen i förvaret bedöms som försumbar. Det innebär att när temperaturen på markytan ovanför förvaret förändras kommer detta, med en viss fördröjning, att påverka betongens temperatur. Under normala betingelser påverkas inte betongens egenskaper av temperaturförändringar men i samband med att en permafrost når förvarsdjup kan den frysa sönder och dess förmåga att fördröja radionuklidtransport påverkas (Emborg et al. 2007).

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Värmetransport i betongbarriärerna beskrevs endast översiktligt i Fud-program 2010. SSM framförde i sin granskning inga synpunkter på detta, men efterlyste ett förbättrat underlag för att bedöma risken för och omfattningen av de skador som frysning kan orsaka på cementbarriärer, se vidare avsnitt 22.2.3 Fasändring/frysning.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

SKB har inte genomfört någon forskning rörande värmetransport i betongbarriärerna under den aktuella perioden.

Program

SKB planerar inte att genomföra någon forskning rörande värmetransport i betong under den kommande perioden, men följer den internationella forskningen i ämnet.

22.2.3 Fasändring/frysning

Betongens motstånd mot frostsprängning beror på dess porstruktur och vattenmättnadsgrad. Gelporerna och kapillärporerna fylls mycket snabbt av vatten vid normalt utomhusklimat. Vid vattenabsorption under lång tid, vattenfylls även de grövre luftporerna. När betongen fryser övergår en viss del av porvattnet till is och den uppkomna expansionen kan åstadkomma så stora inre spänningar i betongen att den skadas allvarligt (Emborg et al. 2007).

Vattnets fryspunkt i betongen sjunker med minskad porstorlek. Exempelvis fryser inte vatten i en por med diametern 150 ångström förrän vid $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vid normal frystemperatur är därför vattnet i gelporerna och i de finaste kapillärporerna fortfarande inte fruset. Ju större andel av det totala porvattnet som inte är fruset vid en viss temperatur och ju större andel luftporer som finns i betongen desto mindre är risken för att betongen ska skadas vid temperaturer under $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

I ett geologiskt slutförvar är fuktbelastningstiden dock så lång att samtliga porer i betongen har hunnit vattenfyllas innan en permafrost når förvarsdjup. Den exakta temperaturen vid vilken betongen fryser är dock helt beroende av dess porstruktur, vilken i sin tur är beroende av hur betongen har tillräts samt dess ålder och de kemiska processer som den tidigare utsatts för.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 redovisades resultaten från den då nyligen genomförda teoretiska studien av frysning av betong i SFR (Emborg et al. 2007). Den huvudsakliga slutsatsen i denna studie var att betongen i SFR kommer att frysa sönder vid en temperatur mellan 0 och $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ och att betongen efter frysning och tining kunde förväntas ha en struktur motsvarande grus.

I sin granskning efterlyste SSM ett förbättrat underlag för att bedöma risken för och omfattningen av skador på cementbarriärer orsakade av frysning.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Under 2011 genomfördes försök med frysning av betongkärnor från BMA (Thorsell 2011). Undersökningen visade att betongen fryser sönder mellan -3 och $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Den övervägande majoriteten av provkropparna frös sönder vid $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ och efter frysning antog betongen formen av grus, figur 22-2.

SKB har även låtit genomföra ytterligare en modellering av konsekvenser av frysning av betong i ett geologiskt slutförvar. Här låg fokus främst på de betongtyper som använts vid konstruktionen av BMA samt silon. Undersökningen kan dock betraktas som allmängiltig då den betong som användes vid uppförandet av BMA och silon båda kan anses vara av standardtyp.

I denna studie (Luping och Bager 2013) är de övergripande slutsatserna att betongen som använts i konstruktionerna i SFR inte kommer att spricka sönder på det sätt som beskrivits av Emborg et al. (2007). Motiveringen till detta är att betongen förväntas stå under ett externt tryck från vatten som frusit vid en lägre temperatur i omgivande mer porösa material.



Figur 22-2. Betongprov från BMA efter frysning vid $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Program

Den experimentella undersökningen av betongprover från BMA (Thorsell 2011) kan anses bekräfta de slutsatser som drogs i Emborg et al. (2007). Båda dessa studier har dock behandlat i sammanhanget mycket ung betong. I verkligheten kommer betongen att ha utsatts för kemisk omvandling genom lakning och reaktioner med upplöst avfall och det kringliggande grundvattnet under flera tusen år, innan den fryser första gången. Dessa processer, som beskrivs i avsnitt 22.2.15 Upplösning, utfällning och omkristallisation, kommer att påverka porstrukturen i betongen och därmed även frysningsegenskaperna.

Ett forskningsprojekt pågår sedan 2010 i samarbete med Chalmers tekniska högskola med syftet att undersöka de kemiska och mekaniska egenskaperna hos åldrad betong, se även avsnitt 22.2.15. Målsättningen med detta projekt är att först utveckla en metod för accelererat åldrande av fasta cementprovkroppar, vilket sedan ska följas av en studie av deras egenskaper efter olika lång tids åldrande. I projektet diskuteras möjligheten att genomföra studier av frysegenskaperna hos det åldrade materialet.

Slutsatserna i Luping och Bager (2013), vilka pekar på en möjlighet att betong under tryck inte skulle påverkas av frysning på det sätt som beskrivs i Emborg et al. (2007) påkallar en viss uppmärksamhet. I syfte att försöka verifiera de slutsatser som drogs av Luping och Bager (2013), genomförs därför en experimentell undersökning av frysning av betong under tryck. Arbetet är en inledande studie och har bedrivits i form av ett examensarbete vid Lunds Tekniska Högskola som redovisades under 2013.

22.2.4 Vattenupptag och -transport under omättade förhållanden

Vid förslutning är vattenmättnaden i betongen låg och vattenflödet i barriärerna försumbar. Visst vatten kan förekomma initialt via inträngning från vattenförande sprickor i berget eller som kondens. Närvaron av vatten påverkar de kemiska processerna i betongen som till exempel armeringsjärnets korrosionsbenägenhet. Betongen i barriärerna kommer att bli vattenmättad efter förslutningen. Enligt beräkningar vattenfylld den minst genomsläppliga förvarsdelen i SFR på 25 år (Holmén och Stigsson 2001). Tiden det tar att fullständigt mätta övriga förvarsdelar är betydligt kortare.

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap för nya insatser om skäl för detta framkommer.

22.2.5 Vattentransport under mättade förhållanden

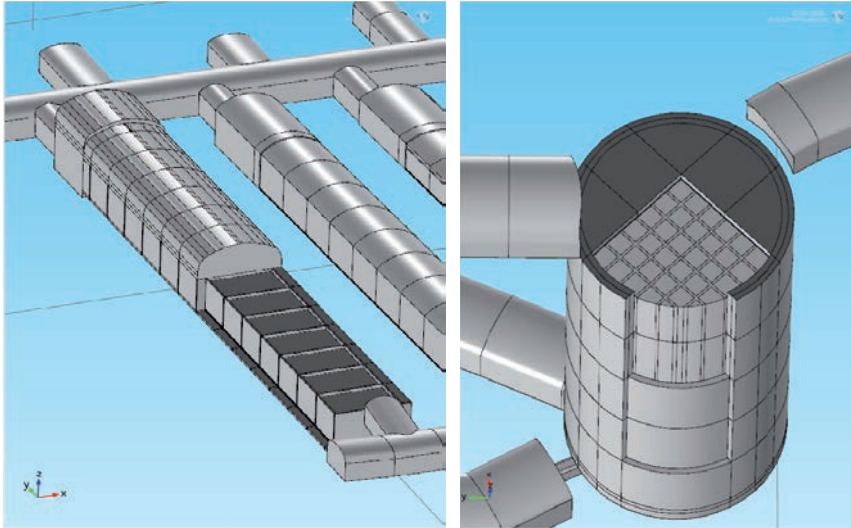
Vattenflödet genom betongbarriärer bestäms av tryckgradienten, barriärens geometri samt av betongens genomsläpplighet, vilken beskrivs av dess hydrauliska konduktivitet. Betong av hög kvalitet har låg konduktivitet och fungerar då som en effektiv flödesbarriär. Processer som degraderar betongen påverkar också dess hydrauliska konduktivitet. Bildandet av genomgående sprickor skapar lokala flödesvägar, som kan ha stor påverkan på barriärens effektiva konduktivitet. Sönderfrysning av betong är ett annat exempel som har stor konduktivitetspåverkan.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

Metod- och modellutveckling för beräkningar av vattenflöden i förvarets närzon har genomförts inom ramen för säkerhetsanalysen för SR-PSU. Modellerna beskriver befintligt SFR och utbyggnaden med en förfinad geometrisk beskrivning av förvarsdelar, betong- och bentonitbarriärer, avfall och återfyllning, se figur 22-3. Beräkningar har genomförts för att analysera vattenflödet som funktion av en gradvis degradering av betongbarriärerna i förvaret och vidare hur detta påverkar transporten av radionuklider ut ur förvaret.

Program

Utvecklingen av flödesmodeller, vilka omfattar degraderade barriärer fortsätter. Lokala degraderings-effekter, som exempelvis uppkomsten av sprickor eller områden med väsentligt förändrad genomsläpplighet, kommer studeras ytterligare. Då degraderingsprocesser som påverkar betong ofta styrs av kemiska reaktioner, bedöms det vara intressant att hantera flöde och reaktiv masstransport sammankopplat inom en och samma modell, med en gemensam geometrisk beskrivning av förvarsbarriärer. Vidare inleds ett arbete att koppla samman etablerade beräkningsverktyg för flödesmodellering och geokemisk modellering.



Figur 22-3. Geometribeskrivningen av BMA och silon i flödesmodellen för förvarets närzon. Vissa delgeometrier på förvarsdelarnas ovansida är bortlyfta för att tydligt visa diskretiseringen av förvarsdelarnas barriärer.

22.2.6 Gastransport och vattenlöslighet

Gasbildande processer som tar vid när SFR är förslutet leder till att ett gastryck i betongbarriärerna byggs upp. Gas kommer att lösa sig i betongens porvatten tills detta är mättat. Lösligheten bestäms utifrån de olika gasernas partialtryck (linjärt korrelerade vid jämvikt). Löst gas kan transporteras genom advektion och diffusion, se avsnitt 20.2.20 Gasbildning och gastransport.

Eftersom utflödet av gas som bildas vid korrosion av betongarmering begränsas när porerna i betongbarriären är vattenmättade, kommer gas att ackumuleras och ett internt gastryck att byggas upp.

När trycket överstiger kapillärkraften i porerna kommer vatten att förträngas tills en gasfas bildats som då kan transporteras. Gasförande passager kan bildas i barriären och gas strömmar ut så länge som tryckskillnaden överstiger kapillärtrycket. Gas kan dock även transporteras i form av ett ”bubbel-flöde”, det vill säga utan att en sammanhängande gasfas bildas (Neretnieks och Ernstson 1997).

I BMA kan bildad gas transporteras ut ur förvaret genom små sprickor i betongen eller genom skarvar mellan betongkomponenterna. I silon kan gas transporteras ut genom sandfyllda gasavledningsrör i locket.

SKB har i dag inget separat forskningsprogram rörande gastransport och vattenlöslighet i betongbarriärer. Som resultat av kommande analys av den långsiktiga säkerheten i SFR kan dock ett specifikt program komma att formuleras.

22.2.7 Tryck från svällande avfall

Vattenupptag i hygroskopiskt avfall kan orsaka svällning, vilket beskrivs i avsnitt 20.2.17 Vattenupptag/svällning. Om inte tillräcklig expansionsvolym tillhandahålls kan sådant avfall generera tryck, vilket mekaniskt kan påverka avfallsbehållare såväl som omgivande betongbarriärer.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Den mekaniska påverkan som svällande, bitumenstabiliserat avfall har på omgivande betongbarriärer i BMA och silon har utretts inom ramen för SR-PSU. Effekterna analyserades med hjälp av strukturmekaniska beräkningar i finita elementprogrammet Comsol Multiphysics. För BMA konstaterades att expansionsvolym, utöver den som ges av respektive avfallspaket, var nödvändig för att säkerställa att betongbarriärer inte skadas. För silon antogs endast expansionsvolymen inom respektive avfallspaket vara tillgänglig. Det motsvarande stationära svälltrycket ansattes som randvillkor. Beräkningsmodellen visade att trycket inte skapade några skadliga spänningar i silons yttre betongväggar.

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap för nya insatser om skäl för detta framkommer, till exempel framtagandet av nya avfallstyper.

22.2.8 Tryck från bentonit

Bentonit sväller i närvaro av vatten och kommer, då den är innesluten att utöva tryck på sin omgivning. Silon är för närvarande den enda förvarskonstruktion där bentonit ligger an direkt mot en betongbarriär och där kan utöva mekanisk påverkan. När förvaret vattenfyllts och bentoniten mättats med vatten förväntas ett svälltryck i storleksordningen 100 kilopascal. Trycket verkar radiellt mot betongen i ytterväggarna i silon, vars konstruktion är avsedd att kunna ta upp laster av detta slag. I förhållande till tryckhållfastheten hos en icke degraderad betong är trycket från bentoniten mycket måttligt och förväntas inte kunna orsaka mekanisk skada. Sett över lång tid kan dock betongen spricka och degraderas av kemiska processer. Dess hållfasthetsegenskaper kan då slutligen försämrats så att trycket från bentoniten ytterligare degraderar betongen.

Program

Trycket som byggs upp då silobufferten sväller kommer att modelleras som en del av SR-PSU. Bufferten i silon kommer att provtas för att göra uppdaterade bestämmingar av de hydromekaniska egenskaperna.

22.2.9 Sprickbildning

De huvudsakliga funktionerna hos betongbarriärerna är att minimera advektivt och diffusivt flöde av vatten genom avfallet samt att effektivt fördröja utsläpp av radionuklider genom sorption. Radionukliderna sorberas på de i betongen ingående amorfa och kristallina mineralen. I en sprickfri konstruktion kommer flödet att vara diffusivt och sorptionen av radionuklider god genom stor kontaktyta med betongens komponenter. Vid förekomst av sprickor kommer däremot det advektiva flödet att dominera och sorptionen kommer att försämrats på grund av den minskade kontaktytan mellan vatten och betongens komponenter.

Ett flertal processer kan leda till uppkomst av sprickor i betongbarriärerna varav de viktigaste är:

- Vattenuptag/svällning av avfallet, avsnitt 20.2.17 och 21.2.17.
- Fasändring/frysning, avsnitt 22.2.3.
- Upplösning, utfällning och omkristallisation, avsnitt 22.2.15.
- Metallkorrosion, avsnitt 22.2.18.
- Gasproduktion, avsnitt 22.2.19.

Sprickor i betongen kan även uppkomma redan vid uppförandet av konstruktionen i samband med att betongen hydratiserar.

Förutsättningarna för sprickbildning och mekanismerna bakom de olika processerna som kan leda till sprickbildning redovisas i ovan angivna avsnitt.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 beskrevs sprickbildning i betongbarriärerna översiktligt med hänvisning till de avsnitt där de processer som kunde leda till sprickbildning beskrevs.

SSM ansåg i sin granskning att SKB behöver utveckla säkerhetsanalysen så att hänsyn tas till långsam och gradvis försämring av betongbarriärerna på grund av sprickbildning och degradering.

Nyvunnen kunskap sedan Fud 2010

Nyvunnen kunskap inom de processer som kan leda till sprickbildning i betongbarriärerna redovisas i respektive avsnitt, se ovan.

Program

SKB planerar inte i dagsläget för ett separat forskningsprogram rörande sprickbildning i betongbarriärer. Programmet för forskning rörande sprickbildning i betongbarriärer redovisas i stället i respektive avsnitt, se ovan. För program kring forskning om effekterna av sprickbildning i betongbarriärerna på dess transportegenskaper hänvisas till avsnitt 22.2.4 Vattenupptag och -transport under omättade förhållanden och 22.2.5 Vattentransport under mättade förhållanden.

22.2.10 Bergutfall

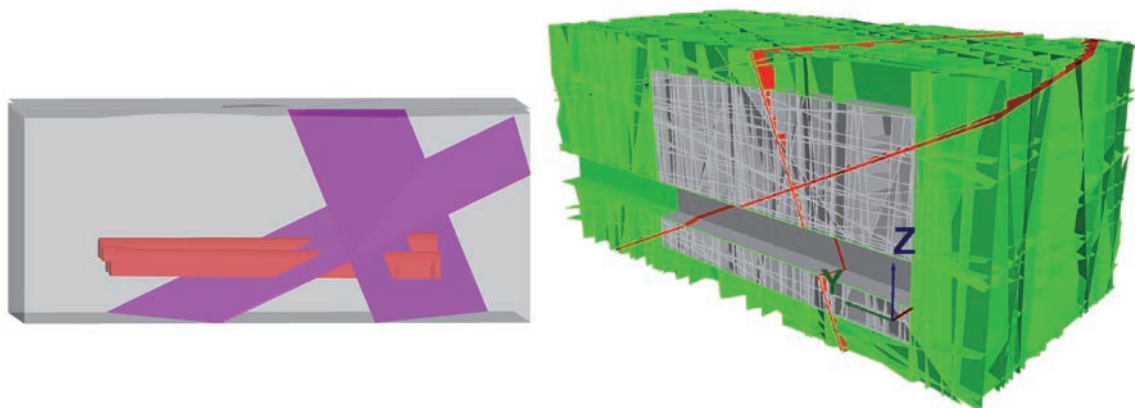
Bergutrymna i SFR utfördes med konventionella sprängnings- och förstärkningsåtgärder 1983–1986. Bergförstärkningen utgörs av helingjutna, icke förspända bultar samt sprutbetong. Regelbunden inspektion görs av bergförstärkningen, och avrapporteras vart femte år till SSM. Inga signifikanta åldringstendenser hade observerats till och med 2011. Smärre åtgärder i form av skyddsskrotning och komplettering av sprutbetong har dock gjorts under drifttiden i de delar av byggtunnlarna som lämnades oförstärkta. Övervakning av berg rörelser med extensometrar i silon samt vid tillfartstunnlarnas passage av den så kallade Singölinjen (en större svaghetszon i berget) har inte påvisat några bergdeformationer under hela drifttiden. SKB bedömer att berget som omger förvarutrymna har en god självbärande förmåga och att bergförstärkningarna fortfarande är i gott skick.

I underlaget till ansökningarna för utbyggnaden av SFR bedöms stabiliteten i bergssalarna påverkas marginellt av att förstärkningselement såsom bergbultar och sprutbetong, inte längre har kvar sin bärlighet. När bärförmågan hos framför allt bergbultarna har avtagit, kan man förvänta sig att enstaka bergblock lossnar och faller in i bergssalarna. Återfyllning med krossat berg skyddar betongbarriärerna från eventuellt fallande block från bergssalens tak och väggar.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

En bergmekanisk tredimensionell simulering av bergets stabilitet har gjorts för befintliga bergssalar (BLA och BMA). Studien kommer att ingå som underlag för ansökningarna om utbyggnad av SFR. Bergssalarnas aktuella geometrier och den geologiska dokumentation som gjordes under byggtiden av mindre deformationszoner och fördelningen av sprickor har använts, se figur 22-4. Simuleringen gjordes i flera steg med successivt reducerade hållfasthetsparametrar för sprickorna. Vid modelleringen tillgodosågs ingen bergförstärkning. Analysen visar att bergssalarna är stabila även med antagandet att kohesion saknas och friktionsvinkeln reduceras till mindre än 15°. Den aktuella bergspänningssituationen samt bergssalarnas form och placering relativt de dominerande spricksystemen är orsaken till den goda stabiliteten. Nedfall av enstaka block kan dock inte uteslutas.

SKB planerar inte att genomföra något ytterligare arbete avseende långtidsstabilitet under den kommande Fud-perioden.



Figur 22-4. Numerisk modell för att simulera degradering av bergmassan runt BLA och BMA. Till vänster visas de mindre deformationszonerna som observerades under byggtiden. Till höger visas ett snitt genom en av de åtta realiseringar med stokastiskt fördelade sprickor. Rött = mindre deformationszoner, grå box = mer detaljerat spricknätverk närmast bergssalarna.

22.2.11 Advektion och blandning

Lösta ämnen kan transporteras in och ut genom betongbarriärerna med advektion, dispersion och diffusion. I det här sammanhanget innebär advektion en transportprocess där ett löst ämne följer vattnets bulkflöde. Advektionen är given av flödet (Darcyflödet) dividerat med porositeten. Porositet är därför viktig då advektion beskrivs. Vattenflödet genom betongbarriärer bestäms av tryckgradienten samt av betongens hydrauliska konduktivitet, se avsnitt 22.2.5 Vattentransport under mättade förhållanden.

I en intakt betongbarriär är den hydrauliska konduktiviteten så låg att all transport av lösta ämnen sker med diffusion. Den låga hydrauliska konduktiviteten är definierad som en av barriärens säkerhetsfunktioner, se avsnitt 18.3 Analys av SFR:s långsiktiga säkerhet. Det är därför av stor vikt att förstå de processer som påverkar betongens egenskaper. Detta beskrivs bland annat i:

- Fasändring/frysning, avsnitt 22.2.3.
- Sprickbildning, avsnitt 22.2.9.
- Upplösning, utfällning och omkristallisation, avsnitt 22.2.15.
- Porvattenspeciering och betonginteraktioner, avsnitt 22.2.16.
- Metallkorrosion, 22.2.18.

Hur den advektiva transporten av radionuklider hanteras i säkerhetsanalyser beskrivs i avsnitt 20.2.22.

Program

Se avsnitt om vattentransport under mättade förhållanden, avsnitt 22.2.5.

22.2.12 Diffusion

I en väl fungerande betongbarriär kommer diffusion att vara den dominerade transportmekanismen. I ett betongförvar där diffusion är den dominerande transportmekanismen kommer uttransporten av radionuklider att vara låg.

Den effektiva diffusiviteten i betong är en viktig parameter både för radionuklidtransport, avsnitt 20.2.22, och för beskrivningen av degradering av betong, avsnitt 22.2.15.

Program

Generellt hanteras osäkerheter i diffusiviteter med pessimistiska data eller med känslighetsanalyser. Inget specifikt program för att bestämma diffusivitet i betong planeras.

22.2.13 Sorption

Se avsnitt 20.2.13 Sorption.

22.2.14 Kolloidtransport och filtrering

Se avsnitt 20.2.14 Kolloidbildning och kolloidtransport.

22.2.15 Upplösning, utfällning och omkristallisation

Kemiska föreningar såsom mineraler och organiska tillsatsmedel i betongbarriärerna kan reagera med varandra och med ämnen som lösts upp från avfallet och dess matriser. Dessa reaktioner kan bidra till att vissa ämnen faller ut och immobiliseras. Omvänt kan detta leda till att ämnen löses upp och görs tillgängliga för transport. Vilka reaktioner som sker och vilka kemiska jämvikter som ställer in sig i betongen, beror på såväl koncentrationen av ingående ämnen i betongen och dess porvatten som ämnen lösta i grundvattnet samt lösta ämnen från bentonitbarriärer, avfallsbehållare, avfallet och avfallsmatriser.

I samband med att betongen åldras, förändras även porstrukturen. Detta kan innebära att porerna växer till på grund av urlakning eller att de sätts igen genom mineralutfällningar. Vilka effekter denna omvandling har på den långsiktiga säkerheten är beroende av materialets önskade egenskaper. Exempelvis kan igensättning av kringgjutningsbruket leda till försämrad gastransport och att ett tryck byggs upp inne i konstruktionen. Å andra sidan kan en igensättning av porerna i betongbarriärerna reducera inflödet av vatten genom dessa, med reducerade utsläpp av radionuklider som följd.

Förändringar i porstrukturen kan även leda till att betongens frysegenskaper förändras då vattnets frystemperatur påverkas av storleken på den por det är inneslutet i, se avsnitt 22.2.3 Fasändring/frysning. Slutligen kan förändringar i porstrukturen leda till sprickbildning genom att svällande mineral avsätts i porer eller befintliga småsprickor. Effekterna av förändringar i porstrukturen i cementbaserade material på dess transportegenskaper redovisas i avsnitt 22.2.4 Vattenupptag och -transport under oömtade förhållanden och i avsnitt 22.2.5 Vattentransport under ömtade förhållanden.

Många fasomvandlingar kan ske utan att ha någon betydande inverkan på förvarets integritet. Andra däremot, exempelvis bildning av ettringit eller thaumasit, anses i vissa fall kunna ha en negativ inverkan på betongstrukturens hållfasthet.

Ettringit kan bildas genom ett flertal olika processer, se exempelvis (Skalny et al. 2002). Ettringitbildningen (och thaumasitbildningen) innefattar dock alltid en reaktion mellan sulfat från antingen en extern eller intern källa samt olika mineraler i cementet. I så kallad sulfatresistent betong, vilken är den typ som använts vid uppförandet av SFR, begränsas mängden trikalciumaluminat, C3A, då en hög halt C3A anses utgöra en riskfaktor för ettringitbildning.

För en betongbarriär i ett geologiskt slutförvar finns två möjliga sulfatkällor: sulfathaltigt grundvatten samt interna källor i betongen. I SFR bedöms inte sulfathalten i betongen utgöra en riskfaktor då den bedöms vara låg. Nedbrytning av sulfonatjonbyttarmassor har framförts som en möjlig process som skulle kunna bidra med en viss mängd sulfat, men denna process är ännu inte helt klarlagd varför några slutsatser kring dess bidrag till ettringitbildningen inte kan redovisas.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Dessa processer behandlades under rubriken Kemisk cement- och betongdegradering i Fud-program 2010. SKB redovisade där att två projekt initierats för studier av åldring av betong och betongs interaktioner med omgivningen och ingjutet avfall.

- Projekt Långtidsbeständighet cement innefattar tre delar varav två experimentella delar och en modelleringsdel. Delprojekt Concrete and Clay genomförs i Äspölaboratoriet och syftar till att studera interaktioner mellan cement och olika avfallsformer samt mellan cement och kringliggande material.
- Projekt Kemiska och mekaniska egenskaper hos åldrad cement bedrivs som ett samarbete med Chalmers tekniska högskola. Syftet med detta projekt är att utveckla en metod för accelererad lakning av fasta tämligen stora cementprover och studera provernas egenskaper som funktion av grad av lakning.

SSM framförde i sin granskning att SKB behöver utveckla säkerhetsanalysen så att hänsyn kan tas till långsam och gradvis försämring av betongbarriären på grund av sprickbildning och degradering. SSM ansåg även att SKB bör underbygga sin argumentation bättre kring motiven för att utesluta vissa betongdegraderingsprocesser som växelverkan mellan cement och olika komponenter i avfallet. SSM ansåg också att SKB bör förtydliga vissa frågor kopplade till jordskalvsrisken, såsom att kemisk omvandling kan påverka betongens hållfasthetsegenskaper och därmed motståndskraften mot skalvrörelser.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Inom projekt Kemiska och mekaniska egenskaper hos åldrad cement har under 2013 en licentiatavhandling redovisats (Babaahmadi 2013). Metoden som utvecklats innebär att cement lakas på elektrokemisk väg med litiumhydroxid och ammoniumnitrat. På så sätt har en accelerationsfaktor på cirka 600 erhållits jämfört med icke accelererad lakning.

SKB har även studerat interaktioner mellan cement och bentonit, främst kopplat till förslutning av borrhål men som även är applicerbart på betongbarriärer i kontakt med bentonit som exempelvis i silon i SFR (Pusch och Ramqvist 2011). Slutsatserna i denna rapport är att de svällande egenskaperna hos bentonit förändrats något efter tre års kontakt med betong samtidigt som betongens hållfasthet påverkats.

Vidare har SKB sedan 2010 inlett ett internationellt samarbete inom projektet Long-term cement studies, LCS, som leds av schweiziska Nagra. Huvudsyftet med detta projekt är att förbättra den allmänna förståelsen av de mekanismer som sker i samband med interaktioner mellan cement, vatten och i vattnet lösta ämnen samt mellan cement och berggrunden. Detta görs genom en kombination av nya experiment i Nagras underjordslaboratorium i Grimsel, studier av naturliga analogier samt modelleringsstudier. Projektbakgrund och redovisning av de experiment som genomförs i Grimsel finns beskrivna i Rüedi (2010).

Inom LCS har under 2012 en försöksenhet för studier av interaktioner mellan injekteringsbruk och granit återtagits. Experimentet hade två huvudsyften, dels att testa och utvärdera metoderna för återtag och analys av återstående prover som deponerats i berget, dels att undersöka interaktionen mellan cement och granit i berggrunden. Studien visade att de använda metoderna fungerade väl, om än inte helt optimalt och att en viss, om än mycket liten mineralomvandling skett i cementbruket i gränssytan mot berggrunden (Rüedi et al. 2012).

Slutligen har SKB låtit genomföra en studie för att genom termodynamisk modellering kunna bedöma betongbarriärernas långsiktiga funktion vid förhöjda karbonatkoncentrationer, se avsnitt 20.2.15 Upplösning, utfällning och omkristallisation.

Program

SKB:s forskningsprogram rörande upplösning, utfällning och omkristallisation av betongbarriärer innefattar ett antal områden.

I Äspölaboratoriet kommer under den kommande Fud-perioden ytterligare prover att deponeras inom projektet Concrete and clay. I denna fas ligger fokus på experiment för att studera interaktioner mellan betong och andra möjliga förvarskomponenter såsom bergkross, bentonit, berggrunden och ämnen lösta i grundvattnet. Dessa experiment kommer till största delen att vara designade för långtidsdeponering i berget och planeras att analyseras först i samband med ett återtag. SKB ser även vissa möjligheter att låta genomföra övervakade experiment där förändringar i materialens egenskaper studeras fortlöpande. Möjligen kommer även studier av hur en pH-plym fortplantar sig genom berggrunden att genomföras, men detta har i dagsläget lägre prioritet.

Projektet Kemiska och mekaniska egenskaper hos åldrad cement planeras att fortsätta fram till hösten 2015, då det avslutas med en doktorsavhandling. Med den metod som nu utvecklats kan tillräckligt stora provkroppar tillverkas för att användas vid studier av mekaniska egenskaper. I det planerade arbetet ingår studier av hur materialets hållfasthetsegenskaper påverkas när portlanditen lakas ur, liksom hur porstrukturen och materialets frysegenskaper förändras av lakningen. I dagsläget pågår framtagning av prover och ytterligare planer för den återstående tiden av detta arbete håller på att upprättas.

Inom projekt LCS ligger fokus de kommande åren på återtag, analys samt modellering av experimenten i Grimsel. Utöver detta fortgår inom LCS ett delprojekt i samarbete med Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, EMPA, med att uppdatera och ta fram nya data för cementrelaterade mineralfaser och därmed förbättra underlaget för termodynamisk modellering av nedbrytning av cement.

22.2.16 Porvattenspeciering och betonginteraktioner

Initialt kommer porvattnet i betongen att hålla ett pH på över 13 och den kemiska sammansättningen beror på mineralsammansättningen hos betongen och på hur betongen varit exponerad för grundvatten. Porvattensammansättningen har en inverkan på de kemiska processerna i förvaret, som till exempel armeringsjärnens korrosionsbenägenhet.

Porvattensammansättningen påverkas av alla kemiska processer både i avfallet och i barriärerna samt sammansättningen hos det inträngande grundvattnet. Hur denna process påverkas av avfallet beskrivs närmare i avsnitt 20.2.15 Upplösning, utfällning och omkristallisation.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 beskrevs processen inte explicit, men däremot togs den upp under avsnittet Porvattensammansättning i de tekniska barriärerna för SFR. SSM hade inga synpunkter på det avsnittet i Fud-programmet.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

De program som beskrevs i Fud-program 2010 rörande kvantifiering av kloridhalten i BMA:s konstruktionsbetong har avslutats. Studien pekar på att kloridhalten lokalt kan vara högre än kloridhalten i inträngande grundvatten.

Program

Beräkningar för porvattenspeciering kommer att genomföras inom ramen för SR-PSU. Den termodynamiska modelleringen kommer att ta hänsyn till cementsammansättningen vid olika lakningsstadier samt sammansättningen av det inträngande grundvattnet vid olika tidpunkter i den framtida utvecklingen av SFR.

22.2.17 Mikrobiella processer

Se avsnitt 20.2.18 Mikrobiella processer.

22.2.18 Metallkorrosion

Metall som finns ingjuten i betongkonstruktioner såsom armeringsjärn, formstag och andra detaljer som stag till stegar, kommer under förverkens livstid att korrodera. Hastigheten för denna korrosionsprocess och dess effekter är beroende av den kringliggande miljön, men även av tekniska detaljer såsom betongens täcksikt och val av betongkvalitet. Ett tjockare täcksikt ger ett bättre skydd mot armeringskorrosion än ett tunt, då det påverkar tidpunkten för initiering av ett flertal processer. Som exempel kan nämnas att både tiden innan kloridhaltigt grundvatten respektive karbonatiseringsfronten når armeringen förlängs med ett tjockare täcksikt. Detta fördröjer tiden innan järnets passivitet upphävs och korrosionshastigheten ökar.

Effekterna av armeringskorrosion är beroende av korrosionens hastighet. Vid väldigt låga korrosionshastigheter kan korrosionsprodukterna hinna transporteras bort och processen leder då till att armeringens tvärsnittsarea minskar. Vid högre korrosionshastigheter kan i stället korrosionsprodukter som upptar större volym än den rena metallen bildas på ståldetaljerna. De kan då skapa ett högt inre mekaniskt tryck vilket i sin tur kan leda till sprickbildning i konstruktionerna, främst i form av lokal spjälkning av täcksiktet (Betongföreningen 2007).

Utöver armeringskorrosionens direkta inverkan på betongkonstruktionens bärrighet leder den anaeroba korrosionsprocessen även till att vätgas bildas. Om korrosionshastigheten är hög, kan det i sin tur leda till att det byggs upp ett gastryck inne i förvarskonstruktionerna.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 presenterades forskningen kring korrosion av metall ingjuten i betongbarriärerna endast översiktligt, med hänvisning till forskningen rörande metallkorrosion i det kortlivade låg- och medelaktiva avfallet. SSM framförde i sin granskning inga konkreta kommentarer kring detta.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

SKB har sedan Fud-program 2010 uppdaterat sin kunskap rörande korrosion av metaller, främst järn och stål, i slutförvarsmiljö, se avsnitt 20.2.19 Metallkorrosion. I detta arbete, vilket genomförts inom SR-PSU, har framkommit att de korrosionshastigheter som tidigare antagits för en alkalisk syrefri slutförvarsmiljö sannolikt har varit överskattade.

Dessa nya data kommer även att kunna anses gälla för det långlivade låg- och medelaktiva avfallet, liksom för metall som gjutits in i betongbarriärerna då dessa kommer att utsättas för samma typ av miljö som avfallet i SFR.

Program

SKB har för avsikt att även under den kommande perioden samordna forskningen kring metallkorrosion och dess konsekvenser till ett gemensamt program innefattande kort- och långlivat avfall samt korrosion av ingjuten metall i betongbarriärerna. SKB:s program för forskning kring korrosion redovisas i avsnitt 20.2.19 Metallkorrosion.

22.2.19 Gasproduktion

Den huvudsakliga källan till gasbildning i betongbarriärerna är anaerob metallkorrosion av armeringsjärn och övriga metalliska komponenter som är ingjutna i betongbarriärerna, såsom formsteg och stag till stegar eller andra detaljer. En annan möjlig källa till gasproduktion är nedbrytning av organiska tillsatsmedel till betongen, såsom flytmedel eller stabiliserande medel där cellulosan i kringgjutningsbruket till silon kan tjäna som ett exempel. Den mängd gas som kan bildas genom kemisk nedbrytning av dessa tillsatsmedel är dock liten i relation till den som kan bildas vid metallkorrosion och bedöms därför inte vara av avgörande betydelse för den långsiktiga säkerheten.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Denna process redovisades inte explicit i Fud-program 2010, utan hanterades i stället inom forskningen rörande metallkorrosion av kortlivat låg- och medelaktivt avfall. SSM framförde inga synpunkter på det i sin granskning. Övriga kommentarer från SSM rörande forskningen kring gasbildning redovisas i avsnitt 20.2.19 Metallkorrosion.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

SKB har inte bedrivit någon forskning rörande gasbildning i betongbarriärer. Den litteraturgenomgång som genomförts inom SR-PSU rörande korrosionshastigheter för metaller i olika miljöer har dock bäring även inom detta område, se avsnitt 20.2.19 Metallkorrosion.

Program

SKB avser inte att bedriva någon forskning som endast är inriktad på området gasproduktion i betongbarriärerna under den kommande perioden. För forskningsprogram rörande underliggande processer hänvisas till avsnitt 20.2.16 Kemisk degradering av organiska ämnen samt avsnitt 20.2.19 Metallkorrosion.

22.2.20 Speciering av radionuklider

Speciering av radionuklider i betongbarriären är liknande den i avfallet, som beskrivs i avsnitt 20.2.21.

22.2.21 Radionuklidtransport i vattenfas

Hantering av radionuklidtransport presenteras i avsnitt 20.2 Processer.

22.2.22 Radionuklidtransport i gasfas

Hantering av radionuklidtransport presenteras i avsnitt 20.2 Processer.

23 Bränsle

Den största delen av det kärnbränsle som ska deponeras i Kärnbränsleförvaret består av använt kärnbränsle från driften av de tolv svenska reaktorerna i Forsmark, Ringhals, Oskarshamn och Barsebäck. Dessa är antingen kokvattenreaktorer (BWR) eller tryckvattenreaktorer (PWR). SKB ska också hantera de mindre mängderna bränsle av annan typ som mellanlagras i Clab, till exempel Mox-bränsle. I SKB:s säkerhetsanalys, SR-Site, uppskattas mängden använt bränsle enligt ett referensscenario (SKB 2010o). Där ingår det använda bränsle som i dag finns i Clab, samt det som uppkommer under den planerade driften av de tio reaktorerna som fortfarande är i drift. I referensscenariot sätts drifttiderna till 50 år för de fyra reaktorerna i Ringhals och Forsmarks tre samt 60 år för de tre reaktorerna i Oskarshamn. De två reaktorerna i Barsebäck stängdes efter ungefär 24 år respektive 28 års verksamhet. De planerade drifttiderna för reaktorerna i Forsmark samt Ringhals 3 och 4 har sedan dess ökats till 60 år.

Majoriteten av det bränsle som används i reaktorerna består av uranoxidbränsle. Från Oskarshamn kommer även mindre mängder blandoxidbränsle, Mox. Mängder och mer detaljer kring använt kärnbränsle finns i (SKB 2010d, s 15).

Skillnader i radionuklidinnehåll mellan PWR- och BWR-bränsle är marginella sett ur ett säkerhetsanalysperspektiv. Mox-bränsle har efter mellanlagring i Clab högre resteffekt än uranbränsle, vilket medför att mindre mängder kan deponeras i varje kapsel eller att en längre avklingningstid behövs.

23.1 Initialtillstånd

Bränslets initialtillstånd beskriver de egenskaper som det använda bränslet förväntas ha när det placerats i en försluten kapsel, som deponerats i ett deponeringshål. Den tekniska utveckling som planeras för hantering av det använda kärnbränslet i enlighet med de krav som slutförvaringen ställer beskrivs i kapitel 11.

23.1.1 Variabler

För säkerhetsanalysen SR-Site beskrivs bränslet med hjälp av en uppsättning variabler som tillsammans karakteriserar bränslet på ett lämpligt sätt för analysen. Beskrivningen gäller bränslet och hålrummen i kapseln, dit vatten kan tränga in vid en skada på kopparkapseln. Variablerna definieras i tabell 23-1 (nästa sida).

23.1.2 Gapinventarium

Under bestrålningen i reaktorn segregeras en viss andel av bränslets radionuklidinventarium till gapet mellan bränsle och kapsling och till korngränser i bränslet. Andelen av radionuklidinventariet som finns i gapet, det så kallade gapinventariet, anses frigöras mycket snabbare än andelen som är inbäddad i bränslematrisen. Gapinventariet är viktigt att uppskatta eftersom det kan ge upphov till pulsutsläpp, som också kallas instant release fraction, IRF. Fissionsgaser (till exempel krypton eller xenon) är mobila och deras beteende är relativt välkänt och dokumenterat i ett antal publicerade studier. En andel av fissionsgaserna segregeras under driften och återfinns i gapet mellan bränslematris och kapsling. Den frigjorda andelen fissionsgaser mäts efter drift vid punktering av bränslestavar och kallas fissionsgasfrigörelse (fission gas release, FGR). Fissionsgasfrigörelsen är viktig att känna till och beräkna främst för säker drift av reaktorerna. I SKB:s säkerhetsanalyser används information om fissionsgasfrigörelse för att uppskatta gapinventariet av vissa segregerade och mobila fissionsprodukter.

Tabell 23-1. Variabler i bränslet.

Variabel	Definition	Kommentar
Geometri	Geometriska mått för bränsleelementets samtliga komponenter, som bränslekutsar och zirkaloykapsling. Även bränslekutsarnas detaljerade geometri inklusive sprickighet ingår.	Inget program. Kunskapen tillräcklig.
Strålningsintensitet	Intensitet av alfa-, beta-, gamma- och neutronstrålning som funktion av tid och rum i bränsleelementet.	Inget program. Kunskapen tillräcklig.
Temperatur	Temperatur som funktion av tid och rum i bränsleelementet.	Inget program. Kunskapen tillräcklig.
Hydrovariabler	Flöden och tryck för vatten och gas som funktion av tid och rum i bränslets och kapselns hålrum.	Inget program. Ej relevant (initialt intakt kapsel).
Mekaniska spänningar	Mekaniska spänningar som funktion av tid och rum i bränsleelementet.	Inget program. Kunskapen tillräcklig.
Totalt radionuklidinventarium	Total förekomst av radionuklider som funktion av tid och rum i bränsleelementets olika delar.	Inget program. Kunskapen tillräcklig.
Gapinventarium	Förekomst av radionuklider som funktion av tid och rum i gap och korngränser.	Avsnitt 23.1.2
Materialsammansättning	De material som bränsleelementets olika delar består av, exklusive radionuklider.	Inget program. Kunskapen tillräcklig.
Vattensammansättning	Sammansättning av vatten (inklusive eventuella radionuklider och lösta gaser) i bränslets och kapselns hålrum.	Se Gassammansättning, avsnitt 23.1.3
Gassammansättning	Sammansättning av gas (inklusive eventuella radionuklider) i bränslets och kapselns hålrum.	Avsnitt 23.1.3

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I SKB:s säkerhetsanalyser används information om fissionsgasfrigörelse för bränsle från lättvattenreaktorer (BWR och PWR) med utbränning upp till 60 MWd/kgU (megawattdygn per kilo uran) och Mox-bränsle med utbränning upp till 50 MWd/kg HM (megawattdygn per kilo tungmetall), för att uppskatta gapinventariet av vissa segregerade och mobila fissionsprodukter. Med hänsyn till den begränsade mängden data för bränsle med utbränning upp till 60 MWd/kgU, användes beräknad fissionsgasfrigörelse för typiskt svenskt BWR-bränsle (Oldberg 2009) och PWR-bränsle (Nordström 2009) för att uppskatta gapinventariet, bland annat för jod och cesium. Dessa beräkningar beaktar effektuttaget, eftersom effektuttaget påverkar fissionsgasfrigörelsen mer än bränslets utbränning, även om de två ofta är relaterade. Planeringen för ökat effektuttag i svenska reaktorer medför en förväntad ökning av fissionsgasfrigörelse i framtiden.

I granskningen av Fud-program 2010 ansåg SSM att SKB bör utreda strukturutvecklingen av HBU-strukturen (High BurnUp structure) och bedöma om frigörelser av främst fissionsprodukter kommer att ökas väsentligt vid ett sent kapselbrott samt om detta möjligen kan leda till ett väsentligt högre pulsutsläpp. Även frågan om ASIED (Alpha Self-Irradiation Enhanced Diffusion) bör utredas ytterligare, ansåg SSM.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

Studien av frigörelse av segregerade radionuklider från bränslesegment från PWR och bränslefragment med hög utbränning och uppmätt FGR fortsätter och kompletteras med analyser av andra radionuklider, som till exempel jod-129 och selen-79. Under perioden har resultat från lakning längre än ett år för fyra PWR-kutsar publicerats (Zwicky et al. 2011). Data angående utsläpp av IRF-nuklider som cesium-137 och jod-129, har publicerats i en separat studie (Ekeroth et al. 2012). Resultaten visar att metoden som används för att förbereda bränsleproven är viktig. Detta gäller framför allt högutbrända bränslen, där gapet mellan bränsle och kapsling brukar vara stängt. När man preparerar prover kan man välja mellan att ta bort kapslingen eller låta kapslingen sitta kvar. Genom att ta bort kapslingen exponeras gapet till vattenlösningen och gapinventariet frigörs snabbare än om kapslingen sitter kvar. I studien undersöktes bränsle med utbränning mellan 43 och

75 MWd/kgU och FGR mellan 0,9 och 5 procent. Resultaten visade att förhållandet mellan jod-129 och FGR var nära ett, för hela utbränningsintervallet och detta stämmer överens med vad man kan förvänta sig utifrån diffusionskoefficienterna för jod och xenon i urandioxid (UO₂). Förhållandet mellan cesium-137 och FGR närmar sig värdet 0,6, som också motsvaras av förhållandet mellan diffusionskoefficienterna för cesium och xenon i urandioxid (Ekeroth et al. 2012).

I ett samarbete mellan Paul Scherrer Institute (PSI), Nagra (Schweiz) och Studsvik Nuclear har nya data erhållits angående snabbt frigjord fraktion (Instant Release Fraktion, IRF) av cesium-137, jod-129 och selen-79 från BWR-, PWR- och Mox-bränsle med utbränning 50–75 MWd/kgU (Johnson et al. 2012). Data visar att fissionsgasfrigörelse (FGR) kan användas som övre gräns för IRF av cesium-137 och jod-129. Johnson et al. (2012) visar att IRF av cesium-137 är mindre än FGR för alla bränslen i studien, och att IRF av jod-129 är jämförbar med FGR, särskilt i de fall där bränslet var separerat från kapslingen. I denna studie ges också, för första gången, experimentella data vilka kan användas för att bestämma det maximala värdet för IRF av selen-79 från högutbränt bränsle. Detta lät sig göras efter en metodutveckling av analys av selen-79, vilken beskrivs i Johnson et al. (2012). Försöken visade också, att porerna i utkanten av kutsen inte bidrar till IRF.

Gapinventariet är en viktig del av bränslets initialtillstånd, och måste uppskattas för användning i SKB:s säkerhetsanalyser. Baserat på de observationer som har gjorts för relationen FGR och gapinventarium för vissa fissionsprodukter föreslår Johnson et al. (2012) att FGR-statistik för ett stort antal bränsleelement bestrålade i en hel härd kan användas för att uppskatta IRF.

ASIED ansågs bidra väsentligt till omfördelning av radionuklider i bränslet i det franska programmet PRECCI, till cirka 2006, men senare modellering och experimentella data (Ferry et al. 2008, 2010) visar att bidraget av ASIED är oväsentligt, även i ett långt tidsperspektiv. Detta ligger till grund för hanteringen i SR-Site (SKB 2010o, s 41–43).

Program

Som följd av planerna på ökat effektuttag och ökad utbränning blir FGR och IRF, det vill säga den snabbt frigjorda andelen radionuklider från bränslet, väsentligt högre än för lågutbränt bränsle. Samtidigt görs hela tiden förbättringar i form av nya bränslen, som ger begränsad FGR även vid högre utbränning och effektuttag. Ett exempel är Adopt-bränsle (Advanced Doped Pellet Technology) från Westinghouse (Backman et al. 2010) och kromdopat bränsle från Areva (Delafoy och Zemek 2010). Nya försök planeras för lakning av dopade kutsar och jämförelse med vanliga kutsar som har bränts i samma reaktor och med känd FGR. Resultaten förväntas ge en bättre uppskattning av IRF samt bidra till mer realistiska samband mellan FGR och IRF. Dessa planerade försök ska genomföras inom ramen för EU-projektet First Nuclides, som påbörjades 2012, där Studsvik Nuclear ska genomföra mätningar av IRF från olika bränslen och utbränningar med stöd från SKB.

23.1.3 Gassammansättning

Vatten i kapselns hålrum förekommer initialt som ånga och även variabeln vattensammansättning behandlas därför i detta avsnitt.

Torkning av bränsle och initialtillståndet med avseende på kvarvarande mängd vatten efter torkning av bränslet beskrivs i avsnitt 11.8 Vatten och vatteninnehåll. Spänningskorrosion på segjärn orsakad av radiolytiskt producerad salpetersyra diskuteras i avsnitt 24.2.7 Spänningskorrosion hos insats.

Vätets påverkan på segjärnets mekaniska egenskaper diskuteras i avsnitt 24.2.2 Deformation av insats.

23.2 Processer i bränsle/hålrum

En rad processer kommer över tiden att förändra tillståndet i bränslet och i kapselns hålrum. Vissa sker under alla förhållanden, medan andra bara är möjliga om kopparkapselns isolering bryts och vatten tränger in i kapseln.

23.2.1 Översikt av processer

Radionukliderna i bränslet kommer med tiden att omvandlas till stabila ämnen genom radioaktivt sönderfall. Processen ger upphov till alfa-, beta- gamma- och neutronstrålning som, genom växelverkan med själva bränslet och med omgivande material, dämpas och omvandlas till värmeenergi. Genom värmetransport i form av värmeledning och värmestrålning ändras temperaturen i bränslet och värme förs bort till omgivningen. Temperaturförändringen kommer att medföra en viss termisk expansion av bränslets beståndsdelar. Detta kan, i kombination med den heliumbildning som alfastrålningen ger upphov till, leda till brott på bränslets kapslingsrör. I en intakt kopparkapsel kommer radiolys av restgaser i hålrummet att leda till att det bildas små mängder korrosiva gaser, som skulle kunna bidra till spänningsskorrosion hos insatsen.

Om kopparkapseln inte är intakt kan vatten transporteras in i kapselns hålrum. Den kemiska miljön förändras därigenom radikalt. Genom radiolys av vattnet i hålrummet kommer den kemiska miljön att förändras ytterligare. Vattnet i kapseln orsakar korrosion av kapslingsrör och övriga metalldelar i bränslet. Om kapslingsrörens isolering skulle vara initialt bruten, eller brytas genom korrosion eller mekaniska påfrestningar, kommer bränslet i kontakt med vatten. Detta leder dels till upplösning av radionuklider som samlats på bränslematrisens yta, dels till upplösning eller omvandling av bränslematrisen och frigörande av radionuklider. Radionukliderna kan antingen lösas i vattnet och bli tillgängliga för uttransport eller falla ut i fasta faser i kapselns tomrum. Detta bestäms av de kemiska förhållandena i kapselns hålrum. Vid bränsleupplösningen kan också kolloider med radionuklider bildas.

Vattenlösta radionuklider kan transporteras med rörligt vatten i kapseln det vill säga advektion, eller genom diffusion i stillastående vatten. Kolloider med radionuklider kan transporteras på samma sätt. Vattenlösta nuklider kan sorberas till de olika materialen i kapseln. Vissa nuklider kan också transporteras i gasfas.

Om vatten finns mellan tillräckligt stora mängder bränslestavar, kan neutronernas energi modereras. Lågenergetiska neutroner kan därefter orsaka fission av vissa nuklider i bränslet och på så vis frigöra fler neutroner. Vid vissa förhållanden kan kriticitet uppnås, det vill säga processen blir självunderhållande.

En del av de bränsleprocesser som ingår i säkerhetsanalysen SR-Site bedöms inte kräva något forskningsprogram. Dessa processer framgår av tabell 23-2.

I de följande avsnitten behandlas forskningsprogrammet för de övriga processerna i bränslet.

Tabell 23-2. Bränsleprocesser som inte bedöms kräva något forskningsprogram, eller hanteras inom teknikutveckling. Processerna är inte kommenterade i granskningen av Fud-program 2010.

Stråldämpning/värmestrålning (se kapitel 11 Teknikutveckling bränslehantering).

Värmetransport.

Vatten- och gastransport i kapselns hålrum, kokning/kondensation.

Termisk expansion/kapslingsbrott.

Advektion och diffusion (se avsnitt 25.5.10 Advektion och avsnitt 25.5.11 Diffusion).

Restgasradiolys/syrabildning (se avsnitt 24.2.7).

Lösning av gapinventarium.

23.2.2 Radioaktivt sönderfall

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

De relevanta radionuklidernas halveringstider är generellt sett välkända. Selen-79 är ett undantag, och dess halveringstid har diskuterats i litteraturen. Det senast publicerade värdet är 327 000 år (Jörg et al. 2010). Tidigare uppskattningar är 280 000 år (He et al. 2002) och 377 000 år (Bienvenue et al. 2007).

Det senast publicerade värdet på halveringstiden för silver-108m är 435,7 år (Schrader 2010). Detta skiljer sig endast obetydligt från tidigare värden, 418 år samt 438 år (Schrader 2004).

Nyvetenskap sedan Fud 2010

SKB har inget program för att studera halveringstider, men följer den utveckling som sker och uppdaterar databasen när så är nödvändigt.

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap för nya insatser om skäl för detta framkommer.

23.2.3 Inducerad fission – kriticitet

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

De kriticitetsanalyser som genomfördes inför SR-Site visar att den effektiva multiplikationsfaktorn (k_{eff}) är under 0,95 inne i en vattenfylld kapsel för alla typer av använt bränsle om man använder utbränningskreditering. Vid vatteninträning kan insatsen deformeras samt aktinider transporteras och deponeras utanför kapseln. Risken för kriticitet utanför kapseln har bedömts som mycket låg på grund av de osannolika händelseförlopp som måste antas för att kritiska förhållanden ska kunna uppstå utanför kapseln, vilket senast har visats av Nicot (2008).

I granskningen av Fud-program 2010 bedömde SSM att SKB behöver redovisa valideringen av ORIGIN-S samt uppskatta osäkerheten vid bestämningarna. SSM ansåg också att metoden för att tillgodoräkna utbränningskreditering behöver redovisas.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

SKB, Posiva och Nagra har under perioden träffats två gånger inom ramen för en serie workshoppar angående analys av kriticitet i ett kärnbränsleförvar och rollen detta spelar i ett långsiktigt perspektiv. Den första workshopen hölls i Stockholm i december 2010 och den andra i Helsingfors i december 2011. Syftet med dessa möten var att informera och samordna insatserna kring kriticitet i ett långsiktigt perspektiv, summera kunskapsläget samt identifiera osäkerheter och framtida utredningsbehov.

Program

SKB:s program för kriticitetsanalyser, inklusive de som berör långsiktig säkerhet, kommer att drivas genom ett projekt kallat Kriticitetsanalys för SKB. Detta beskrivs i avsnitt 11.9 Kriticitet.

23.2.4 Vattenradiolys

Radiolys av vatten i kapselns hålrum bildar oxidanter som har en inverkan på korrosion av bränsle och insats. Vattenkemin påverkar i sin tur mängden lösta oxidanter.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 presenterades studier som visar att små mängder vätgas i vattnet håller nere mängden radiolytiskt producerade oxidanter, samt att bromid i vattnet kan motverka denna effekt genom att reagera snabbare än vätgasmolekylen med hydroxylradikalen.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

När det gäller homogen radiolys, det vill säga radiolys i bulklösning, har en tidigare studie (Pastina och LaVerne 2001) visat att vätgas i lösningen inte bör påverka väteperoxidhalten nämnvärt. Detta går dock emot experimentella observationer. I studien av Pastina och LaVerne (2001), i vilken lösningen utsattes för en extern strålkälla, antogs att dosraten var homogent fördelad i hela vattenvolymen. Nya beräkningar (Trummer och Jonsson 2010) visar att detta antagande var felaktigt. I en vattenlösning som bestrålas med alfapartiklar, deponeras dosen i en mycket begränsad volym av lösningen (Trummer och Jonsson 2010). De nya beräkningar som nu har utförts använder denna begränsade volym, och resulterar i en mycket bättre överensstämmelse med de experimentella

resultaten. I samma arbete rapporteras vid vilka gränsvärden av löst vätgas det inte längre sker någon oxidativ upplösning av använt bränsle, det vill säga det tröskelvärde där bränsleupplösningen avstannar på grund av vätgaseffekten. Studien tyder på att låga halter vätgas (i storleksordningen 10^{-9} molar) är tillräckliga för att motverka effekten av alfaradiolys av några tiotusen år gammalt bränsle (Trummer och Jonsson 2010).

Program

Mekanistiska studier av aktinidoxidtytor i kontakt med vatten och utsatta för olika typer av strålning genomförs i samarbete med Institute for Transuranium Elements (ITU), Tyskland, genom att använda tunna skikt av oxider producerade från gasfas.

En pågående studie av homogen alfaradiolys i närvaro av bromid i plutoniumlösning fortsätter. Vissa svårigheter har uppstått att förbereda lösningarna med önskad halt plutonium-238 med nära neutralt pH-värde.

23.2.5 Metallkorrosion

I ett använt bränsleelement förekommer metaller och legeringar av olika typ och med olika funktioner. Runt bränslestavarna sitter kapslingen, vilken består av zirkaloy. Andra delar består av rostfritt stål, Inconel, Incoloy eller zirkaloy. Styrstavar, vilka kommer att kapslas och placeras tillsammans med PWR-bränsle, består av en legering av 80 procent silver, 15 procent indium och 5 procent kadmium. Dessa metalldelar kommer att innehålla en del radionuklider som uppstått på grund av neutronaktivering, och i samband med metallkorrosion frigörs dessa till vattnet. I säkerhetsanalysen SR-Can antogs pessimistiskt denna korrosion vara snabb, och aktiveringsprodukterna ingick i den snabbt frigjorda fraktionen (IRF). I säkerhetsanalysen SR-Site antas, mer realistiskt, att det tar en viss tid för metalldelarna att korrodera. Undantaget är styrstavarna, i SR-Site antas dessa (mycket pessimistiskt) ingå i IRF. Korrosionen av zirkaloy och andra metaller kontrolleras av materialsammansättning, kemisk miljö i kapseln och temperatur. Processen påverkar frigörelsen av en viss del av radionuklidinventariet.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Inför Fud-program 2010 bedömdes inte området kräva något aktivt forskningsprogram. Därmed listades metallkorrosion som en av de processer som endast krävde bevakning av SKB. Nya behov har dock framkommit i samband med säkerhetsanalysen SR-Site.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

Frigörelsen av aktiveringsprodukter från kapslingen kommer att kontrolleras av korrosionshastigheten av zirkaloy som omvandlas till zirkoniumoxid. Upplösningen av oxidskiktet kontrolleras av lösligheten av zirkoniumdioxid i det omgivande vattnet och borttransporten av löst zirkonium. Lösligheten av zirkoniumdioxid i vatten är mycket låg, runt 10^{-9} molar (Brown et al. 2005). I SR-Site antas inte zirkaloykapslingen ha någon skyddande funktion, däremot går korrosionen långsamt; tillgängliga data indikerar att det tar minst 100 000 år för kapslingsrören att korrodera helt (SKB 2010o).

Frigörelsen av radionuklider som förekommer i Crud (Chalk River Unidentified Deposit; en önskad avlagring på bränsleledarna som bildas i reaktorn) antas ske omedelbart då vatten kommer in i kapseln. Detsamma antas för silverlegeringen i de inkapslade styrstavarna. Detta är ett pessimistiskt antagande speciellt vad gäller de radioaktiva silverisotoperna, vilka kan förväntas frigöras i takt med korrosion av silvermetall (McNeil och Little 1992). Dock saknas i nuläget relevanta experimentella data för korrosion av styrstavslegeringen. Radionukliden silver-108m har visat sig ha stor betydelse för scenarier som involverar tidiga haverier av tekniska barriärer. I brist på data har processen hanterats mycket pessimistiskt, vilket har påverkat vidare hantering i säkerhetsanalysen vad gäller löslighet av silver-108m och stabilt silver.

Program

Baserat på erfarenheter från SR-Site, kommer lakning av styrvavar för PWR-bränsle att undersökas under olika förhållanden med hänsyn till silverutsläpp.

23.2.6 Bränsleupplösning

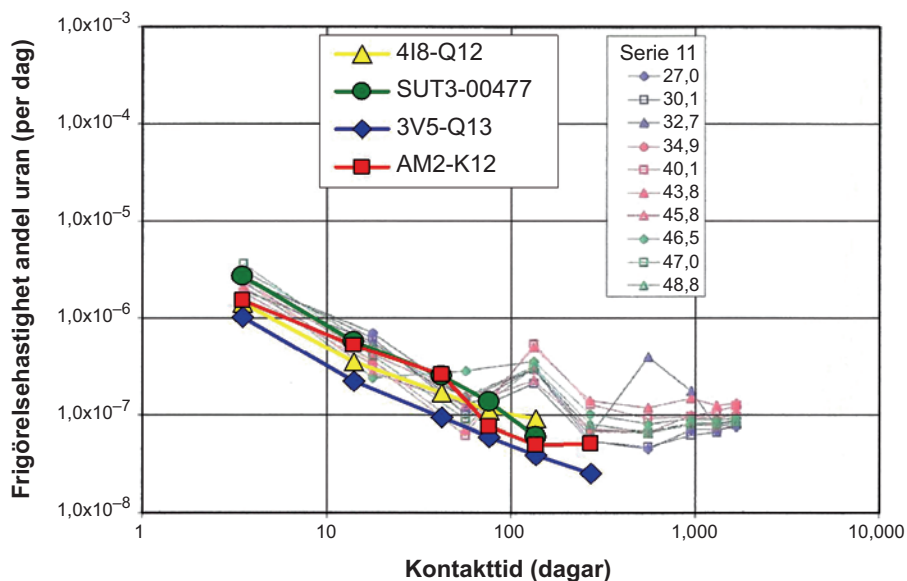
Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I granskningen ansåg SSM att SKB bör göra ytterligare insatser för att förbättra förståelsen av mekanismerna för vätgasens inverkan på bränsleupplösningen. I anslutning till detta bör SKB systematiskt redovisa ytterligare experimentella bevis och modelleringsresultat. SKB bör vidare sträva efter att kvantifiera tröskelvärden för vätgaskoncentration över vilket vattenradiolys förhindras, samt om ett sådant värde i så fall kan upprätthållas när bentonitbufferten delvis eller helt har eroderats bort. SSM ansåg att SKB bör undersöka möjligheten för katalysatorförgiftning ifall metalliska partiklar aktiverar vätgas.

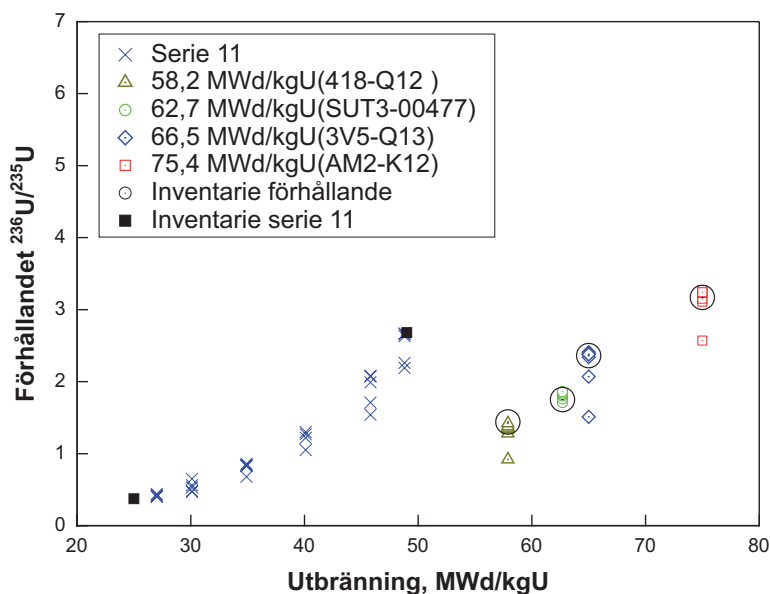
Nyvetenskap sedan Fud 2010

Med hänsyn till den förutsedda ökningen av medelutbränning av bränslet i framtiden, genomfördes en serie försök med högutbränt bränsle (medelutbränning högre än 50 MWd/kgU) under olika förhållanden. I den utökade studien ingick lakning av fyra bränslesegment med hög utbränning (55–75 MWd/kgU) genom att använda samma lakningsprocedur som tidigare (Serie 11, Forsyth 1997). Sammantaget visar resultaten för hela utbränningsintervallet att utsläpp från bränsle inte ökar proportionellt med utbränning (Zwicky et al. 2011). Kumulativ frigjord andel uran, figur 23-1, är inte högre än motsvarande värden för bränsle från Serie 11 (utbränning 21–49 MWd/kgU).

Eftersom kanten av kusten har högre utbränning än de centrala delarna, undersöktes inverkan av den högutbrända kanten på mängden oxiderat uran i lösning. Genom att jämföra förhållandet uran-236 och uran-235 i laklösningen för varje tidsintervall med medelvärdet (inventarietvärdet), kan man dra slutsatser om från vilken del av kusten uranet främst har lakats. Uran från den högutbrända kanten har en högre uran-236/uran-235 kvot. Resultaten visar att i alla laklösningar är kvoten i början lägre än inventarietvärdet, följt av en ökning med tiden upp till medelvärdet, se figur 23-2 (nästa sida). Detta tyder på en långsammare upplösningshastighet för den högutbrända kanten. Detsamma gäller frigörelsehastigheten för andra redoxkänsliga nuklider som molybden och teknetium.



Figur 23-1. Frigjord andel uran för högutbrända bränslen (Zwicky et al. 2011) i jämförelse med serie 11 för bränsle med utbränning 30-49 MWd/kgU (Forsyth 1997).



Figur 23-2. Förhållandet mellan uran-236 och uran-235 i laktösning från högutbränt bränsle (öppna symboler) för olika kontaktperioder jämfört med inventarievärdet (cirkel) (Zwicky et al. 2011) och liknande data från mindre utbränt bränsle (Forsyth 1997) (kryss, inventariet med kvadrat). I alla laktösningar är förhållandet mellan de två uranisotoperna i början lägre än inventarievärdet, följt av en ökning med tiden upp till maxvärdet.

Under de första tiotusen åren i slutförvaret förväntas de höga halterna reduktanter (järn(II) och vätgas), vilka bildas vid anoxisk järnkorrosion, att effektivt förbruka de oxidanter som produceras genom radiolys. I försök med bränsle under argon (Cui et al. 2011), noteras att vattenradiolys bidrar till en oxidativ upplösning av bränslet. Detta orsakar frigörelse av aktinider och fissionsprodukter, vilkas halter mäts i experimentens laktösning. För att simulera förhållandena i slutförvaret, tillsattes två små metallfolier av järn och kopplades till ett experiment med bränsle under argon. Analyser av laktösningen visade att frigörelsen av fissionsprodukterna cesium, molybden och strontium inte påverkades nämnvärt, medan halterna av uran, neptunium, och teknetium föll påtagligt. Detta visar, att trots den starka strålningen från bränslet, förmår kontakten med järn att skapa reducerande förhållanden (Cui et al. 2011). Fällningar av järn(III)oxid bidrar också till minskad frigörelse av radionuklider i vatten.

Mekanismen bakom vätgasens påverkan på bränsleupplösningen har, i ett antal studier, kopplats till den katalytiska effekten av metalliska epsilon-partiklar (innehållande molybden, palladium, teknetium, rodium och rutenium). Hypotesen är att dessa metallpartiklar, vilka förekommer i bränslematrisen, aktiverar vätgas på bränsleytan. Metalliska partiklar, extraherade från använt bränsle genom upplösning av urandioxidmatrisen i het fosforsyra, har undersökts (Cui et al. 2012), med målsättningen att bättre karakterisera partiklarna. Analys med transmissionselektronmikroskop (TEM) visade att dessa partiklar är under en mikrometer i diameter, samt ofta uppbyggda av aggregerat av mindre partiklar (10–20 nanometer). Dessutom är de metalliska partiklar som bildas i den högutbrända kanten av en bränslekuts (rim) mindre och innehåller mer palladium, än de som bildas i inre delen av kutsen. Detta beror på den variation i lokal temperatur och neutronbestralning som sker under tiden i reaktorn. Cellparametrarna för legeringen har bestämts med röntgendiffraktion och Exafs (Extended X-ray Analysis Fine Structure) mätningarna visar en mycket homogen legering.

I nästan alla autoklavförsök med bränslelakning under vätgas märks en minskning av halterna av redoxkänsliga nuklider under försökets gång, denna minskning pågår under veckor eller månader, beroende på bränsleytans area, temperatur samt hur pass bra bränslet var tvättat med karbonatlösning inför försöket (för att ta bort det föroxiderade skiktet). Minskningen tyder på att det sker en reduktion och fällning av de redoxkänsliga nukliderna, inklusive uran, någonstans i systemet. För att testa om fällningen skedde på autoklavväggarna, plockade man i ett försök bort bränslet och analyserade

därefter autoklaven för uran efter sköljning med salpetersyra (Albinsson et al. 2003). Bara en procent av mängden fälld uran hittades på autoklavväggarna, resterande mängd hade antagligen fällts på bränsleytan. Att bekräfta detta med observation av bränsleytan till exempel med svepelektronmikroskop (SEM), är inte möjligt eftersom man inte kan observera urandioxid på bränsleytan.

För att undersöka om redoxkänsliga nuklider faller på bränsleytan, har ett försök genomförts där man i lösningen tillsatte ett redoxpar som inte finns i bränsle: $\text{CrO}_4^{2-}/\text{Cr}^{3+}$. Krom(VI) i form av kromat är mycket lösligt i den pH som ansattes i försöket, medan krom(III) bildar kromhydroxid ($\text{Cr}(\text{OH})_3(\text{s})$) om halten krom(III) är högre än storleksordningen 10^{-6} molar. Försökets syfte var att kunna urskilja om vissa områden av bränsleytan orsakar reduktion av krom(VI) till krom(III), som sedan kunde detekteras via fällning av mörkgrön kromhydroxid. Resultaten är publicerade och visar ett homogent lager kromhydroxid som täcker hela bränsleytan (Puranen et al. 2012). Om det skulle produceras oxidanter någonstans vid ytan, skulle de oxidera krom(III) till gul krom(VI) och lösa upp kromfällningen. Några andra observationer från det försöket är att reduktion och fällning är en yteffekt: några millimeter upp i bränslekorgen (en korg av guldnät i vilket bränslet är placerat), där gammalfältet är i princip oförändrat, finns ingen grön fällning. Den finns bara i de delar av guldnätet som är i kontakt med bränslepulver.

Väteperoxid dissocieras katalytiskt på oxidtytor och i bulklösning, med syre och vatten som slutprodukter. Första steget i den processen är splittring av väteperoxidmolekylen i två hydroxylradikaler (OH-radikaler) (Hiroki och LaVerne 2005). I ett försök med Simfuel i argonatmosfär (Nilsson och Jonsson 2011) analyserades halterna väteperoxid och uran i lösning som funktion av tid. Resultaten visar att 99,8 procent av väteperoxiden dissocieras vid ytan av Simfuel och bara 0,2 procent orsakar oxidation av uran uppmätt som uran(VI) i lösning. För att undersöka hur fissionsprodukter påverkar oxidativ upplösning av bränsle, genomfördes försök med uranoxid dopad med yttrium samt ren urandioxid och ren yttriumoxid, i närvaro av väteperoxid (Trummer et al. 2010). Resultatet visar att minskningen av den oxidativa upplösningen av yttrium-dopad uranoxid, vilken minskar jämfört med ren urandioxid, inte kan förklaras av katalytiskt sönderfall av väteperoxid på yttriumoxid. Den troliga förklaringen är i stället att yttrium i gittret ökar motstånd till oxidation, vilket medför att en större del väteperoxid sönderfaller. I arbetet diskuteras också en möjlig mekanism bakom vätgaseffekten: När väteperoxid sönderfaller på metalloxydytan är första steget bildning av två hydroxylradikaler, vilka startar en reaktionskedja med vatten och syre som slutprodukter. I närvaro av vätgas bryts denna kedja genom att vätgasen reagerar med hydroxylradikalerna och då producerar väteatomer och vatten. Detta medför en minskad produktion av väteperoxid och oxiderat uran i lösning.

Den mekanistiska skillnaden mellan urandioxid och dopade urandioxidmaterial, som till exempel Simfuel, har undersökts (Lousada et al. 2013). En speciell reagens (Tris-buffert) har använts för att analysera bildade hydroxylradikaler från splittring av väteperoxidmolekyler. Resultaten visar att skillnaden i oxidativ upplösning för de två materialen huvudsakligen beror på skillnader i redoxreaktivitet. I samband med detta beräknas nya värden för det relativa utbytet av olika oxidanter för bränsleupplösning.

Undersökning av mekanismen bakom vätgaseffekten kräver förståelse av vad som händer med den väteperoxid som bildas genom radiolys. Det finns framför allt två möjliga reaktionsvägar då väteperoxid reagerar med urandioxidyten: elektronöverföring och oxidation, eller katalytiskt sönderfall av väteperoxiden. I en studie som jämför reaktiviteten hos olika urandioxidmaterial innehållande olika tillsatser (Simfuel, urandioxid med yttriumoxid, urandioxid med palladium eller urandioxid med båda tillsatserna) med väteperoxid, uppdagas inga större skillnader mellan materialen (Pehrman et al. 2010). Dock är förhållandet mellan upplösta uranyl-species och förbrukad väteperoxid mycket lägre för dopad urandioxid. Detta kan bero på olika hastigheter för de två olika reaktionsvägarna, alltså mellan elektronöverföring (oxidation av uran) eller katalytiskt sönderfall av väteperoxid. Hur mycket av väteperoxiden som förbrukades genom katalytiskt sönderfall kunde uppskattas genom att analysera primärprodukten av sönderfallet (hydroxylradikalen), med en lämplig reagens som funktion av tiden. Detta jämfördes med uppmätt redoxaktivitet hos dopade kutsar. Resultaten visar att större mängd väteperoxid sönderfaller katalytiskt på ren urandioxid än på dopade kutsar, men skillnaderna är inte stora, högst 30 procent. Skillnaderna är däremot mycket större när det gäller redoxreaktiviteten och resultaten visar tydligt att ren urandioxid är mer reaktiv än dopad urandioxid, samt att denna skillnad minskar med aktiviteten hos oxidanten. Dessa resultat förklarar de observerade skillnaderna i oxidationsutbyte för dopade kutsar och urandioxid.

Påverkan av sulfidjoner på strålningsinducerad upplösning av använt bränsle har undersökts genom användning av förenklade modellsystem (Yang et al. 2013). Reaktionen mellan sulfid och väteperoxid är snabb och det förbrukas tre till fyra väteperoxidmolekyler per oxiderad sulfid, det vill säga sulfid är en effektiv avskärmare för väteperoxid. Att sulfid reagerar snabbt med väteperoxid betyder att även de små mängderna sulfidjoner som kan finnas i grundvattnet efter kontakt med koppar och järn, inte kan nå bränsleytan så länge den producerar väteperoxid. Experiment med gammarradiolys i närvaro av sulfid visar att frigörelse av radiolytiskt oxiderat uran minskar med halten sulfid i lösning. Sulfid reducerar också uran(VI) i anoxiska lösningar. Påverkan av sulfid på uran(VI) reduktion med ädelmetallpartiklar i närvaro av vätgas visar att sulfid inte påverkar hastighet för reduktion av uran(VI) med palladium-vätgas-systemet. Därmed visas att ingen förgiftning av palladiumkatalysatorn kan detekteras i närvaro av relativt höga halter sulfid (1 millimolar). Enligt Yang et al. (2013) kan detta bero på den höga halten upplöst vätgas, som orsakar desorption av sulfid från palladiumytan.

En kritisk översikt av de modeller som används för att beskriva strålinducerad upplösning av urandioxidbränsle har publicerats (Eriksen et al. 2012). Modellerna baseras på en stor mängd experimentella data, som tagits fram i kemiska och elektrokemiska försök med olika typer av material som simulerar använt bränsle. Användning av hastighetskonstanter som relaterar till ytan av fasta fasen ger resultat som stämmer mycket bättre med experimentella data än tidigare radiolytiska modeller (Christensen 1998), där man antar upplösning av ett ytskikt och hastighetskonstanter för homogena system. Användning av hastighetskonstanter som är bestämda experimentellt, tillsammans med verifiering av reaktionsmekanismer, är viktiga både för kemisk eller elektrokemisk modellering.

I EU-projektet Micado (Model uncertainty for the mechanism of dissolution of spent fuel in nuclear waste repository) och i samarbete med KTH bedömdes sex olika modeller, som beskriver bränsleupplösning i slutförvar under geologiska tidsperioder, med avseende på osäkerheter. Projektet, vilket avslutades 2010, undersökte huvudsakligen modell- och parameterosäkerheter och deras påverkan på hela systemet under de olika stadierna i ett slutförvar. Resultaten är nu tillgängliga i Grambow et al. (2010, 2011).

Inom EU-projektet Redupp och i samarbete med Stockholms universitet har lakningsförsök genomförts med fokus på förändringar av provytan under upplösningens gång. För att öka förståelsen kring upplösningprocesserna används material med fluoritstruktur, det vill säga samma mineralstruktur som urandioxid. Delresultat från dessa studier har rapporterats (Godinho et al. 2011, 2012, Evins och Vähänen 2012, Stennett et al. 2013, Corkhill et al. 2013). Hittills har de resultat som framkommit visat att, vid förhållanden långt från jämvikt, varierar upplösningshastigheten beroende på kristallografisk orientering och struktur på den exponerade ytan (Godinho et al. 2011, 2012, Corkhill et al. 2013). De mindre stabila kristallytor löser upp sig fortare och lämnar kvar de mer stabila kristallplanen (111) och (100) i kontakt med lösningen. Detta medför en förändring av ytans topografi och ökar dess area, utan att för den skull öka reaktiviteten; i stället verkar detta öka stabiliteten då ytan till större del utgörs av stabila kristallytor (Godinho et al. 2012).

Ett delprojekt i Redupp relaterar till påverkan av naturligt grundvatten på upplösning av alfadopat urandioxid. Här undersöks möjligheten att spårämnen i vattnet kan påverka upplösningprocessen, och resultaten jämförs med de som tidigare har tagits fram med syntetiskt grundvatten. De preliminära resultat som hittills har publicerats (Evins och Vähänen 2012) visar att, i försök där relationen mellan ytarea och lösningsvolym, SA/V (Surface Area/Volume), var fem per meter (m^{-1}), detekterades ingen påverkan av alfadopningen. Resultaten är i samklang med tidigare försök utförda med syntetiskt grundvatten. Det finns dock tecken på att resultaten kan påverkas av en ökad SA/V.

Program

Under den kommande perioden planeras insatser för att ta fram data angående bränsleupplösning under slutförvarsliknande förhållanden samt insatser för att belysa mekanismen för de olika processerna som bidrar till bränsleupplösning.

Lakning av högutbränt bränsle under oxiderande förhållanden samt under vätgas, kommer att fortsätta under kommande år. Dessa försök görs för att bekräfta och få bättre underlag för lakningsegenskaper av högutbränt bränsle. Nya typer av bränsle, så kallat dopat bränsle, har tagits fram på senare tid. Detta bränsle har tillsatser som till exempel krom eller aluminium, vilka ökar kornstorleken i bränslekutsarna och därmed minskar FGR. Tack vare att de nya typerna av bränsle har bättre egen-

skaper i reaktorn kommer de att bli vanligare i framtiden. Kunskap om IRF och upplösningshastighet för dopat bränsle kommer att behövas för att beskriva dess beteende i slutförvaret.

Både experimentella mekanistiska studier och modelleringsstudier kommer att genomföras för att få en bättre förståelse av bränsleupplösning under slutförvarsförhållanden, vilket också påtalats av myndigheterna (SSM 2011).

EU-projektet Redupp pågår till och med mars 2014 och delprojekten fortsätter att undersöka de effekter upplösningen har på ytstrukturen hos de studerade oxiderna ceriumdioxid, toriumdioxid och urandioxid. En modelleringsstudie ingår, med fokus på kopplingen mellan de experimentella resultaten och teoretiska beräkningarna av kristallytornas relativa stabilitet. Upplösning av alfadopad urandioxid fortgår, med utökad ytarea i relation till lösningsvolym (SA/V). Dessutom ingår studier med gadolinium-dopad urandioxid, också de med relativt hög SA/V.

23.2.7 Speciering av radionuklider, kolloidbildning

I scenariot med en skadad kapsel har redoxförhållandet i närområdet en mycket stor betydelse. Ett forskningsprogram för att studera de redoxprocesser som förväntas ske i en skadad kapsel, speciellt deras kinetik, pågår sedan några år på SKB.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 presenterades data från termodynamik och kinetik, vilka visar att ett samtidigt utsläpp av radium och barium i sulfatrika vatten orsakar medfällning av radium med barium som radiumbariumsulfat. Det noterades dock att ytterligare kinetiska studier krävs för att ta reda på hur snabbt radiogent radium upptas av redan utfälld barit ($\text{BaSO}_4(\text{s})$).

I granskningen av Fud-program 2010 skrev SSM att SKB bör studera, redovisa och sammanställa aktuell forskning kopplat till bildning av kolloider och amorfa faser baserade på uran, plutonium eller andra aktinider och deras eventuella relevans för radionuklidtransport när bildade kolloidpartiklar inte filtreras av en eroderad buffert. SKB bör vidare beakta om scenarier för förvarets utveckling med perioder av minskade sulfathalter kan ha betydelse med hänsyn till ändrade löslighetsförhållanden, avklingning, biosfärsbetingelser etc. SSM ansåg också att SKB bör undersöka betydelsen av eventuella nya species (blandade metallkomplex) för lösligheten av radionuklider.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

För att bättre förstå de redoxprocesser som förväntas ske i en skadad kapsel, har en studie av interaktionen mellan selen (redoxkänslig) och järnkorrosionsprodukter under syrefria förhållanden utförts. Studien visade att selen(IV) kan immobiliseras genom reduktion till selen(0) på den magnetit som täckte järnytan (Puranen et al. 2010a). Studien visade också att reaktionen var snabbare i närvaro av uranyljoner, möjligen på grund av en stegvis mekanism vilken involverar reduktion av uranyl och oxidation av magnetitskiktet, vilket då omvandlas till en blandad oxyhydroxid av järn(II) och järn(III). Järnoxider och speciering av selen på järnytan undersöktes med Ramanspektroskopi och mikro-XANES (X-Ray Absorption Near Edge Structure), för att bestämma oxidationstalen för uran och selen på ytan.

Reduktion av selen(IV) och selen(VI) provades med vätgas och metallisk palladium, en känd vätgaskatalysator. Selenit (selen(IV)) visade sig adsorbera på palladium och reducerades till selen(0) i närvaro av vätgas. Ingen sorption eller reduktion observeras för selenat (selen(VI)) vilket beror på den höga barriären för en stegvis elektronreduktion av selenat (Puranen et al. 2010b). Genom att använda en elektronaccelerator, samt olika reagens i lösningen, kunde det bevisas att det finns en märkbar barriär för en-elektronreduktion av selenat och bara mycket starka en-elektronreduktanter kan reducera selenat till selenit.

Uranyl, karbonat och väteperoxid förväntas vara närvarande i ett slutförvar för använt kärnbränsle. Kunskapen angående de komplexspecies som kan bildas i lösning är för närvarande ganska begränsad. I ett nytt arbete har speciering och stabilitetskonstanter för blandade peroxid-karbonatkomplex bestämts genom att använda både klassiska metoder (potentiometrisk titrering) och NMR (Nuclear Magnetic Resonance) (Zanonato et al. 2012).

Påverkan av järn(II) i lösning på den radiolytiska upplösningen av urandioxid och plutoniumdioxid med plutonium-238 har studerats (Amme et al. 2012). Väteperoxid produceras vid ytan av plutoniumdioxiden och förbrukas i lösning genom reaktion med järn(II)-joner samt på ytan av urandioxid(s) genom oxidation av ytan. Reaktion av järn(II)-joner med väteperoxid producerad från radiolys, den så kallade Fentonreaktionen, producerar en hydroxyl-radikal som är en stark oxidant, samt järn(III). Hur dessa processer påverkar en upplösning av aktinidoxider diskuteras. Uran(VI) i lösning reduceras av järn(II), och eftersom järn(II) även förbrukar radiolytiskt producerad väteperoxid, kommer en hög koncentration av järn(II) i lösning att fördröja storskalig oxidativ upplösning av urandioxid.

Den oxiderande upplösningen av aktinidoxider såsom urandioxid, neptuniumdioxid och plutoniumdioxid orsakad av väteperoxidlösningar utan komplexbildare har studerats i samarbete med Institute for Transuranium Elements (ITU), Tyskland (Pehrman et al. 2010). Resultaten visar att väteperoxid förbrukas mest i närvaro av urandioxid, följt av neptuniumdioxid och minst med plutoniumdioxid. Detsamma gäller halt av oxiderade aktinidjoner i lösning, men på grund av de relativt höga väteperoxidhalterna som användes i försöket sker fällning av uran- och neptuniumperoxid. Eftersom motståndet till oxidation ökar från urandioxid till neptuniumdioxid till plutoniumdioxid, förväntas också andelen väteperoxid som undergår katalytiskt sönderfall på oxidytan öka på liknande sätt.

Upptag av radium i syntetisk barit (BaSO_4) undersöktes i en studie genomförd vid Paul Scherrer institute (PSI), Schweiz (Curti et al. 2010). I ett första steg undersöktes, genom upptag av barium-133 från lösning, hur fort omkristallisering av barit sker. Studien indikerar att omkristalliseringen av barit sker med en konstant hastighet samt att fördelningen av barium-133 i nybildad barit är homogen. I ett andra steg undersöktes upptag i barit av radium-226 från lösning, och det visade sig att radiumbarit bildas som fast lösning, samt att detta sker med relativt hög hastighet och i termodynamisk jämvikt med lösningen. Det noteras också att den fasta lösning som bildas mellan radiumsulfat och barit är icke-ideell, vilket är något oväntat.

Scenarier med minskade sulfathalter, som ändrar löslighetsförhållanden till exempel för radiumsulfat samt utsläpp av kolloider hanteras pessimistiskt i SR-Site. Beräkningarna i huvudscenariot för korrosionsfallet är gjorda utan löslighetsgränser, i stället antas hela det upplösta inventariet vara i lösning. Undantaget är uran-238, på grund av den stora mängden som finns i bränslet, vilken antas ha reducerats på järnytan eller dess korrosionsprodukter och bilda amorft urandioxid. Detta är huvudkällan till radiumbildning i kapseln, via sönderfall till torium-230, som också anses sorberas i kapselns inre.

Program

Studier av redoxkinetik för olika oxiderade former av radionuklider (bland annat teknetium(VII), neptunium(V) och plutonium(V), plutonium(VI)) på färsk och korroderade järnytor kommer att fortsätta i samarbete med Studsvik, Nagra, ITU och PSI.

Samfällning av radium med barium ska studeras vidare i experiment som involverar lösningsanalyser samt karakterisering av den fasta fasen. För detta krävs att spektroskopiska och mikroskopiska metoder (TEM-bilder) ska fortsätta. Studien ska genomföras i samarbete med Forskningscenter Julich i Tyskland.

SKB fortsätter att delta aktivt i OECD-NEA-projektet TDB (Thermochemical Data Base Project) där kvalitetsfrågor angående användning av termodynamiska databaser i säkerhetsanalyser diskuteras regelbundet.

Ett försök med bränsle och järnpulver i argonatmosfär pågår i Studsvik. De produkter som deponeras på järnytan ska analyseras vid försöksavslut och detta förväntas öka förståelsen för möjliga nya faser eller specier som kan bildas i slutförvarsmiljö.

23.2.8 Heliumproduktion

Heliumkärnor från alfasönderfall i bränslet bildar gasformigt helium som ansamlas i gasbubblor. Om trycket i dessa bubblor blir tillräckligt stort, kan det orsaka strukturförändringar i bränslet. Dessa strukturförändringar kan teoretiskt öka fraktionen relativt löslösa radionuklider, som snabbt kommer ut i lösning vid vattenkontakt.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 presenterades resultaten av det franska programmet (Ferry et al. 2007, 2008), vilka pekade på att heliumuppbyggnaden inte orsakar ökad sprickbildning i urandioxidbränsle med en utbränning upp till 47,5 MWd/kgU. Därmed bedömdes det tillräckligt att SKB:s program för denna process endast innebar bevakning av den pågående internationella forskningen i området.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Det franska programmet har fortsatt sina beräkningar av heliumproduktion i bränsle, nu i urandioxidbränsle utbränt upp till 60 MWd/kgU. En modell har använts för att bedöma utvecklingen av bränslets mikrostruktur innan förväntad kontakt med vatten (Ferry et al. 2010). Slutsatserna är, att efter 10 000 år, kommer bränslets mikrostruktur inte att påverkas negativt av heliumuppbyggnaden. Detta är i linje med tidigare resultat (Ferry et al. 2007, 2008).

Studier som relaterar till heliumdiffusion och migration i bränslet har publicerats under perioden. Dessa refererar till tidigare av intio-studier (Yun et al. 2009) och pekar på vikten av att i detalj förstå processerna i den fasta fasen, som leder till bildning av heliumbubblor i urandioxid-gittret (Yakub et al. 2010). Simuleringar med Molecular Dynamics har utförts i detta syfte (Yakub 2011), vilka indikerar högre löslighet av helium i UO_{2+x} jämfört med stökiometrisk urandioxid.

Program

Sedan Fud-program 2010 har det framkommit behov av ytterligare studier för att belysa hur helium från bränslet på lång sikt kan bidra till övertryck i kapseln, då det frigörs från bränslet. Därför har modelleringsstudier startats i syfte att beräkna mängden helium som bildas över tid i både uranoxid och Mox.

23.2.9 Kemisk omvandling av bränslematrisen

Det använda bränslet kan, på lång sikt och beroende på kemisk miljö, omvandlas kemiskt. I en reducerande miljö med kiselhaltigt vatten, finns möjligheten att urandioxidmatrisen omvandlas till mineralet koffinit (Janeczek och Ewing 1992). Om det finns en kemisk drivkraft för denna reaktion skulle detta kunna innebära att radionuklider i bränslematrisen frigörs genom kongruent upplösning (Grambow et al. 2011).

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Processen beskrevs inte i Fud-program 2010.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Under de senare åren har ett antal studier utförts för att utöka kunskapen om koffinit och uranorhit (U,Th -silikat). Det återstår fortfarande vissa osäkerheter kring hur koffinitisering påverkar bränsleupplösning i ett långt tidsperspektiv (Grambow et al. 2011). En översikt av publicerad litteratur visar att det i dagsläget är svårt att utröna under vilka förhållanden, framför allt vid vilka temperaturer, koffinit är stabil relativt uraninit och kvarts (Evins och Jensen 2012). En studie av en uranmineralisering i Athabasca basin visar att koffinit bildades vid temperaturer under 50 °C (Mercadier et al. 2011). Detta stämmer överens med andra observationer från naturliga system vilka pekar på att koffinit faller ut vid relativt låga temperaturer, under 130 °C (Deditius et al. 2012). Det finns dock andra studier som också kopplar koffinitbildning i naturen till högre temperaturer, 125–170 °C (Min et al. 2005, Křibek et al. 2009). I naturen bildas thorit oftast vid temperaturer mellan 200–400 °C (Deditius et al. 2012), och tidigare kalorimetriska studier visar också på ökad stabilitet för thorit vid temperaturer högre än rumstemperatur (Mazeina et al. 2005). De laboratorieförsök som har utförts med syfte att syntetisera ren koffinit har dock stött på svårigheter (Pointeau et al. 2009), och nya studier som utförs fokuserar på syntetisering av uranorhit med en sammansättning av $Th_{1-x}U_xSiO_4$ (Costin et al. 2012). De publicerade synteserna av koffinit och uranorhit har skett vid hydrotermala temperaturer, 250 °C (Pointeau et al. 2009, Costin et al. 2011, 2012), men det bör noteras att kolloider bestående av uran(IV)-silikat har framställts i laboratorium vid rumstemperatur

(Dreissig et al. 2011). I ett försök där reaktionstiden förlängdes upp till 672 timmar, vid 250 °C noterades att en nanokristallin blandning av oxider övergick till att mestadels bestå av uranotorit (Costin et al. 2011). Detta tyder på att syntesen är kinetiskt kontrollerad av en omvandlingsprocess som innefattar upplösning och medfällning. Eftersom uraninit, i en reducerande miljö, kan bevaras under mycket långa tidsrymder (till exempel i Oklo), kan detta tolkas som att även om det skulle finnas en termodynamisk drivkraft för omvandlingsprocessen, så är det en mycket långsam process (se till exempel Grambow et al. 2011).

Program

Området bedöms i dag inte kräva någon ytterligare forskning, utveckling eller demonstration. Fältet bevakas med beredskap för nya insatser om skäl för detta framkommer.

24 Kapsel

24.1 Initialtillstånd

Kapselns initialtillstånd beskriver de egenskaper som kapslarna förväntas ha när de placerats i deponeringshålen och inte kommer att hanteras mer i Kärnbränsleförvaret. De krav och konstruktionsförutsättningar som relaterar till kapselns barriärfunktion i slutförvaret beskrivs i avsnitt 12.1 Krav och förutsättningar med utgångspunkt i (SKB 2010c) i underlaget till ansökan.

24.1.1 Variabler

I analysen av den långsiktiga säkerheten används ett antal variabler vars värden varierar med tiden som respons på de långsiktiga förändringarna hos kapselns kopparhölje och insats. De initiala värdena hos dessa variabler kan antingen hämtas från information om egenskaper hos tillverkade och inspekterade kapslar eller annan dokumenterad information, se tabell 24-1.

De värden på variablerna som definierar initialtillståndet för kapseln kan utrönas från referensutformningen och relaterar bland annat till tjockleken på kopparhöljet (variabeln geometri) samt halterna av föroreningar och andra ämnen i kopparn (variabeln materialsammansättning). Den initiala strålningen på kapselytan (variabeln strålningsintensitet) beskriver också en del av initialtillståndet. Alla initiala värden på variablerna beskriver kapselns egenskaper och är nära sammankopplade med konstruktionsförutsättningarna, se avsnitt 12.1 Krav och förutsättningar. Dessa är definierade så att kapseln ska motstå de laster (till exempel svälltryck från buffert) som förekommer initialt samt kan tänkas uppstå i förvaret.

Kapseln ska förhindra kriticitet vilket medför att insatsens utformning ska vara sådan att kriticitet inte kan uppstå även om vatten trängt in i kapseln. Detta relaterar till variabeln geometri samt även materialsammansättning, eftersom vissa grundämnen som förekommer i segjärn reflekterar neutroner bättre än järn. Temperaturen på kapselmaterialet påverkar kapselns mekaniska egenskaper och därmed definieras också en maximal temperatur i kapselns initialtillstånd.

Fortsatt utvecklingsarbete med kapselutformning beskrivs i kapitel 12 Teknikutveckling kapsel. De forskningsinsatser som planeras inom området för analys av initialtillståndet är fortsatt utveckling av modeller för analys av mekaniska belastningar (se vidare avsnitt 12.3 Kapselutformning – analyser av kapseln). De forskningsinsatser som berör de processer som påverkar de långsiktiga förändringarna hos kapseln, till exempel deformation och korrosion, beskrivs i avsnitt 24.2.

Tabell 24-1. Variabler för kopparhölje och insats och relaterade egenskaper (designparametrar) samt källa där information om variabeln ges.

Variabel	Definition	Kommentar
Geometri	Geometriska mått för kapselkomponenterna, inklusive toleranser vid tillverkningen. Här ingår även beskrivning av eventuella defekter från tillverkning, svetsning och dylikt.	Referenskapseln och initialtillstånd, (SKB 2010c).
Strålningsintensitet	Intensiteten av alfa-, beta-, gamma- och neutronstrålningen som funktion av tid och rum i kapselkomponenterna.	Beräkning av strålningsintensitet beskrivs i avsnitt 11.6 Strålskydd och dosuppskattningar.
Temperatur	Temperaturen som funktion av tid och rum i kapselkomponenterna.	Verifiering av konstruktionsförutsättningarna angående temperatur tas upp i avsnitt 12.1 Krav och förutsättningar.
Mekaniska spänningar	Mekaniska spänningar som funktion av tid och rum i kapselkomponenterna.	Restspänningar från tillverkningen av kapslarna har underordnad betydelse i jämförelse med de mekaniska spänningar som uppstår i komponenterna i slutförvaret.
Materialsammansättning	Materialsammansättningen hos kapselkomponenterna, inklusive eventuella korrosionsprodukter.	Referenskapseln och initialtillstånd (SKB 2010c). Korrosionsprodukter (SKB 2010o).

24.2 Kapselprocesser

24.2.1 Översikt av processer

Genom stråldämpning i kapselmaterialen omvandlas en del av strålningen som tränger ut till kapseln till värmeenergi. Värmetransporten sker genom ledning inom insatsen och kapseln, samt till stor del genom strålning mellan dessa två delar. Strålningen kan tänkas ge en viss materialpåverkan på insats och kopparkapsel. I övrigt har strålningen försumbar inverkan på andra processer i kapseln, utom för korrosionen av insatsen och av kopparkapseln. Detta finns för varje process dokumenterat i de så kallade influenstabeller som redovisas i processbeskrivningen i säkerhetsanalysen SR-Site (SKB 2010o).

Insatsen och kopparhöljet kan deformeras mekaniskt av yttre laster. Koppars krypegenskaper är en viktig egenskap, framför allt initialt då koppar kryper och gapet mellan kopparhölje och insats minskar. Kapseln skulle också kunna deformeras på grund av inre korrosionsprodukter om vatten kommer in i kapseln vid ett genomgående hål i kopparhöljet.

De kemiska processerna omfattar i första hand olika typer av korrosion. Utvändig kopparkorrosion är en avgörande faktor för kopparhöljets integritet. Spänningskorrosion är en möjlig process både i kopparhöljet och i insatsen. Korrosion av segjärn har främst en betydelse om vatten kommer in i kapseln vid ett genomgående hål i kopparhöljet.

Transport av radionuklider i närområdet kan ske via advektion och diffusion i vattenfasen eller i gasfas. Transporten kan också påverkas av sorption och löslighetsbegränsningar.

I de följande avsnitten behandlas forskningsprogrammet för de olika processerna i kapseln. Indelningen i processer följer processbeskrivningen i säkerhetsanalysen SR-Site (SKB 2010o). Processerna stråldämpning/värmealstring, värmetransport, korrosion hos insats respektive galvanisk korrosion (galvanisk korrosion mellan kopparhölje och insats) bedöms inte kräva något forskningsprogram och kommenterades inte i granskningen av Fud-program 2010.

24.2.2 Deformation av insats

I kapitel 12 Teknikutveckling kapsel beskrivs hur arbetet med kapselns referensutformning bedrivs och hur den utvärderas för olika mekaniska laster, utifrån de krav som ställs på kapseln.

I detta avsnitt beskrivs enbart kryp i segjärn och vätetts inverkan på materialegenskaper i segjärn.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Slutsatsen i Fud-program 2010 angående krypning i segjärn var att den sker med en avtagande kryphastighet (så kallat logaritmiskt kryp). För det fortsatta programmet angavs kompletterande krypprovning för att få ett mer enhetligt underlag. I programmet fanns också fortsatta studier av väteladdat material och dess materialegenskaper.

I granskningen av Fud-program 2010 instämde SSM i SKB:s plan med fortsatta studier av påverkan av väte på materialegenskaperna dels vid monoton belastning, dels vid krypbelastning. SSM framförde också att SKB bör komplettera analysen av materialegenskaperna med analys av lämpliga lastfall där dess egenskaper befinner sig vara speciellt kritiska.

Kärnavfallsrådet såg med tillfredsställelse att SKB har inlett forskning om krypning och om vätetts påverkan på materialegenskaper i gjutjärnsinsatsen.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

Slutsatserna från de preliminära resultaten av krypprovning av segjärnet, som presenterades i Fud-program 2010 kvarstår och finns nu också rapporterade (Martinsson et al. 2010). Den observerade logaritmiska krypningen innebär att deformationen är avstannande och att den totala töjningen även efter mycket lång tid kan beräknas. Kryptöjningen bedöms bli mindre än 0,1 procent i insatsen i förvaret och därmed har krypning i segjärn försumbar inverkan på insatsens egenskaper.

Arbetet med att studera väteladdat segjärn har fortsatt, framför allt för att bestämma hur långt in i materialet som vätet tar sig vid elektrolytisk laddning. Samma stegmetod som utvecklats för att studera väteinträning i koppar (Martinsson och Sandström 2012) har använts för segjärnet. Metoden innebär att runda provstavar väteladdas, svarvas av till olika djup och vätehalten i kvarvarande del analyseras med smältextraktion. Preliminära resultat visar att det även i segjärn bildas en profil av vätehalten med upp till 50 gånger mer väte i ytan än i det ursprungliga materialet. För längre laddtider går vätet längre in (upp till någon millimeter för laddning i 100 timmar), medan halten närmare ytan når en mättnad (profilen blir flackare). Efter avslutad laddning sker en snabb avgasning av materialet, särskilt vid förhöjd temperatur, till exempel 100 °C.

Program

Ingen fortsatt krypprovning av segjärn (prover från fler insatser, ett utvidgat temperaturintervall etc) är planerad för närvarande, eftersom SKB anser det vara av lägre prioritet.

Arbetet med vätetts effekt på segjärnet och dess materialegenskaper sammanställs och avrapporteras. Torkning av bränsle och initialtillståndet med avseende på kvarvarande mängd vatten efter torkning av bränslet beskrivs i avsnitt 11.8 Vatten och vattenånga. För att bedöma eventuell väteinträning kan modellarbete liknande det som gjorts för väteinträning i koppar bli aktuellt, se avsnitt 24.2.3. För att utvärdera effekter på insatsens hållfasthet måste också lastfall identifieras där eventuell väteinträning skulle ha någon betydelse. Lastfallen identifieras inom ramen för den uppdaterade designanalysen, se avsnitt 12.3 Kapselutformning – analys av kapseln.

Som ett ytterligare verktyg för att förstå hållfastheten hos koppar respektive segjärn stödjer SKB ett doktorandprojekt på KTH, där defekters roll studeras genom beräkningar av dislokationsdynamik. Metoden innebär att i ett nätverk av dislokationer får dislokationerna samverka med varandra och med andra defekter, och rörelsen hos varje dislokation beräknas och studeras. Detta planeras att tillämpas för områdena fosfors inverkan på koppars plastiska egenskaper och krypegenskaper samt för utskiljning av koppar i segjärn vid bestrålning.

24.2.3 Deformation av kopparkapsel vid yttre övertryck

I kapitel 12 Teknikutveckling kapsel, beskrivs hur arbetet med kapselns referensutformning bedrivs och hur den utvärderas för olika mekaniska laster, utifrån de krav som ställs på kapseln. Deformationen av kopparn från yttre övertryck vid olika laster behandlas integrerat med insatsen.

I detta avsnitt redovisas forskningen om koppars krypegenskaper och andra materialrelaterade egenskaper.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SKB:s program för att beskriva kopparmaterialets egenskaper planerades omfatta framför allt krypegenskaperna, med flera inriktningar parallellt: framtagande av fundamentala ekvationer för FSW-material, implementering i modeller med finita elementmetoden av belastning och inverkan av kallbearbetning liksom av fleraxliga spänningstillstånd. Vidare ingick i programmet inverkan av väte på kopparn genom kontrollerad väteladdning av materialet, inklusive modellering av löslighet och diffusion av väte i koppar.

I granskningen av Fud-program 2010 ansåg SSM att SKB bör fortsätta arbetet med att säkerställa inverkan av fosfor och svavel på koppars krypegenskaper. SSM bedömde dessutom att SKB inte i tillräcklig grad har visat att fosfordopad koppar har ett duktilt beteende även vid mycket långa kryptider. I detta avseende bedömde SSM även att kopplingen mellan krypsprödhet och koppars innehåll av fosfor och syre behöver utredas ytterligare med avseende på reduktion av koppar(I)oxid (Cu_2O) under bildande av koppar och vattenånga. SSM ansåg vidare att det vid kommande analyser med finita elementmetoden är viktigt att beskriva hela den tänkta lasthistorien för kapseln, med tanke på att kallbearbetad koppar har lägre krypduktilitet jämfört med icke tidigare plastiskt deformerat kopparmaterial.

SSM höll med SKB om att väteets eventuella roll för koppars krypegenskaper borde undersökas vidare. SSM uppmuntrade till fördjupning inom detta område genom att dels undersöka om väte kan påverka kopparens krypegenskaper eller orsaka någon typ av försprödningsmekanism, dels undersöka varför vätehalten i koppar är många tiopotenser högre än lösligheten av väte i koppar vid jämvikt.

Kärnavfallsrådet ansåg att SKB har undersökt krypegenskaperna hos koppar noggrant, men att en validerad krypmodell ännu fattas. Vidare skrev Kärnavfallsrådet att speciellt krypduktiliteten hos koppar minskar med ökande kalldeformation, som uppstår av olika skäl, exempelvis vid tillverkning eller på grund av bergskjivning. Om kopparhöljets integritet kan upprätthållas under olika belastningar i förvaret, måste detta visas genom krypmodellering. Studierna av krypning i svetsar är ännu för få och i fortsättningen måste SKB mera ingående studera krypegenskaper hos friktionssvetsar liksom geometriska diskontinuiteter som visar högsta töjningar i designanalys.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

Den fundamentala krypmodellen utan passningsparametrar som presenterades 2009 och utgick från grundläggande dislokationsrelationer (Sandström och Hallgren 2009), har visats fungera för ytterligare situationer. Modellen har publicerats vetenskapligt och där också jämförts med data från krypprovstavar med runda anvisningar, det vill säga med fleraxliga spänningstillstånd (Sandström 2012). Modellen har vidare jämförts med spänningstöjningskurvor för kallbearbetat material och visats kunna beskriva krypkurvorna även för dessa fall (Sandström och Hallgren 2012). Den fundamentala krypmodellen kan åtminstone approximativt täcka in spänningar ned till 40 megapascal (vilket har verifierats experimentellt), medan de bäst tillgängliga metoderna för extrapolation av krypdata i dag kan användas för att förutsäga uppkomsten av brott ned till spänningar på 150 megapascal vid 75 °C med rimlig säkerhet. Eftersom krypning i kapseln även sker vid dessa lägre spänningar är den utvecklade modellen viktig för prediktering av kapselns uppträdande efter långa tider. För att kunna simulera hela kapslar med finita elementmetoden behöver dock den använda krypmodellen anpassas till de stora deformationer som kan uppstå, till exempel för att kunna inbegripa kallbearbetning i belastningshistorien.

Vidare finns preliminära resultat från studier med transmissionsspektroskopi (TEM) av krypprobad kallbearbetad koppar, och som troligen kan förklara den längre kryplivslängden med finare och mer stabila ”subgrains” (delar av korn).

Inverkan av lokal kallbearbetning har studerats genom krypprovning av platta provstavar med koniska intryck. Preliminära slutsatser visar att varken kryplivslängd eller krypduktilitet hos provstavarna påverkades av intrycken, eftersom materialet kryper mer runt de hårdare lokala kalldeformerade områdena.

En modell för spricktillväxt i koppar har satts upp (Wu et al. 2011, 2013). Två typer av krypskador beaktas, vilka betecknas som duktila respektive spröda. Det duktila krypbrottet baseras på att krypduktiliteten ska överskrida ett visst värde. Kryptöjningen beräknas med den fundamentala krypmodellen. Det spröda krypbrottet baseras på omfattningen av krypkaviteter i korngränserna, som beräknas med en modell för bildning och tillväxt av krypkaviteter (se nedan om fosfors inverkan). Det duktila brottet dominerar vid lägre temperaturer, 22 och 75 °C. Vid högre temperaturer, 175 och 215 °C och speciellt om spänningstillståndet är utpräglat fleraxligt, erhålls sprött brott i sprickspetsen. Spricktillväxten studerades med krypprovning av CT-provstavar (compact tension). Modellen har visats kunna representera inverkan av temperaturen på spricktillväxt liksom inverkan av spänningstillståndet, som i experimenten varierats genom provning med CT-provstavar med reducerat centralt tvärsnitt (med så kallade side grooves).

Inverkan av pålastningstid vid krypprovning har studerats (Andersson-Östling och Sandström 2011), och den totala töjningen har visats vara 30–50 procent (förlängning, eller teknisk total töjning), vilket överensstämmer med tidigare provning med kortare pålastningstider. Pålastningstöjningen ökar med ökande pålastningstid, på bekostnad av kryptöjningen. En modell där initial plastisk deformation och krypning (primärt och sekundärt) kombinerats kunde väl beskriva krypprovningsdata. De fundamentala modellerna för plastisk deformation respektive krypning som beskrivits ovan har utnyttjats. Under pålastning dominerar plastisk deformation töjningen tills spänningen är nära den konstanta lastnivån. Därefter kommer all töjning från kryp.

Arbetet med fundamentala ekvationer också för material svetsat med friktionsomrörning har drivits vidare och beskrivs i (Sandström et al. 2013). På samma sätt som för grundmaterialet har spänningstöjningskurvor använts, beskrivna med samma ekvationer som för grundmaterialet. De största skillnaderna ligger i att sträckgränsen är högre (och har en större variation). Med utgångspunkt från spänningstöjningskurvorna har sedan en krypmodell härletts. I både modellen för plastisk deformation och den för krypning spelar den dynamiska återhämtningen stor roll. När dislokationer av motsatt tecken möts, eliminerar de varandra. Växelverkansavståndet mellan dislokationerna är satt till dubbla radien för dislokationernas kärnor. Detta växelverkansavstånd är något mindre i modellerna för svetsat material än i motsvarande modeller för grundmaterialet. Detta kan antas bero på en mer komplex struktur i svetsen, vilket gör det svårare för dislokationerna att växelverka. Dessa grundläggande konstitutiva ekvationer för svetsförband har verifierats genom jämförelser med dragprov vid olika temperaturer och töjningshastigheter samt med krypprov där primär- och sekundärskedet väl kunnat representeras.

Arbete med att implementera de fundamentala krypekvationerna i finita elementmodeller har genomförts. Förenklingar behövs vid den numeriska integrationen av krypekvationerna, och tre olika metoder har använts. Fortsatt arbete krävs dock innan ekvationerna kan användas i finita elementmodeller för kapselberäkningar.

Modellstudier av en fullstor kapsel pågår för att undersöka belastningar, både jämna och ojämna, på kapselns yttre yta och hur de inverkar på spänningar och töjningar i materialet, särskilt i svetsen. En elastoplastisk analys genomförs där de mycket låga töjningshastigheterna som uppträder vid krypning i kapseln beaktas. De fundamentala modeller för grundmaterial och svetsförband som beskrivits ovan utnyttjas. Övrigt arbete med analyser av belastningar på fullstor kapsel finns redovisat i avsnitt 12.3 Kapselutformning – analyser av kapseln.

Restspänningar i svetsområdet har också analyserats, genom att koppla värmetransport och elastoplastisk deformation i en finit elementmodell (Jin och Sandström 2012). Resultaten från modelleringen indikerar att fördelningen av restspänningar är känslig för vinkeln och asymmetrisk i förhållande till svetslinjen. De högsta dragspänningarna, såväl modelleringsresultat som uppmätt med hålbörning (hole-drilling) och röntgendiffraktion överstiger dock inte 50 megapascal.

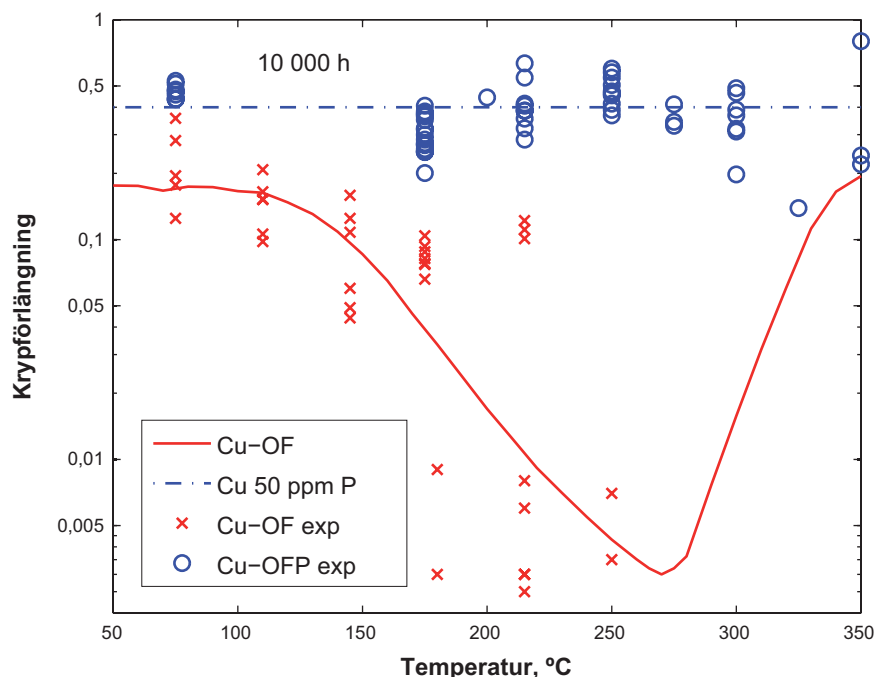
Fosfors inverkan på koppars krypegenskaper har studerats vidare. I ett tidigare arbete (Sandström och Andersson 2008) har fosfors effekt på kryphållfastheten beskrivits bero på att fosforatomerna (som är lösta i koppars) bildar ”atmosfärer” runt dislokationer, och därmed låser dislokationerna från att fritt kunna röra sig. En extra spänning behövs för att få dislokationerna att bryta sig loss, vilket ger förhöjd kryphållfasthet. I ett annat tidigare arbete antogs att fosforatomer på samma sätt kunde minska korngränsglidningen och därmed reducera kavitetbildning (Sandström och Wu 2007). Detta skulle förklara att koppar med fosfor har mycket högre krypduktilitet än fosforfritt material vid högre temperatur (> 160 °C). Detta är fortfarande en aktuell mekanism, men inte den enda tänkbara. I en studie med dragprovning av koppar med och utan tillsats av fosfor kunde ingen stor skillnad i korngränsglidning konstateras och författaren drog slutsatsen att förklaringen med att fosfor låser dislokationerna inte är korrekt (Pettersson 2010). Ätminstone en del av skillnaden i kryphållfasthet ansågs i stället bero på intergranulära sprickor. Resultat från det fortsatta arbetet indikerar att en förklaring till att den uppmätta korngränsglidningen i Pettersson (2010) inte skiljer sig mellan materialen kan vara att dragprovningen skett så snabbt att fosforatomerna inte hinner diffundera till korngränser som rör sig (Sandström och Wu 2013).

SKB:s arbete med analyser och modellering av hur fosfor inverkar på bildningen och tillväxten hos krypkaviteter fortsätter. Pettersson (2010) erhöll en korngränsglidning som var väsentligt större än den Sandström och Wu (2007) hade utgått ifrån. För att studera betydelsen av storleken på korngränsglidningen har i det nya arbetet Petterssons högre värde använts. Det visar sig att skillnaden i krypduktilitet mellan koppar med och utan fosfor fortfarande kan förklaras. I det nya arbetet används den interaktionsenergi mellan fosfor och korngränserna som tagits fram med ab initio-beräkningar (Korzhavyi et al. 2001). Flera olika mekanismer är tänkbara för denna växelverkan, men eftersom de har nästan samma interaktionsenergi så påverkas den beräknade krypduktiliteten inte nämnvärt och valet av den exakta mekanismen blir inte avgörande. Den nya modellen för bildning och tillväxt av kaviteter är, på samma sätt som den fundamentala krypmodellen, formulerad utan användning av anpassade parametrar. En del av de små skillnaderna i duktilitet och hållfasthet mellan koppar med och utan fosfor som Pettersson observerade i sina dragprovförsök kan inte förklaras med hjälp av kavitetsmodellen. Däremot kan de beskrivas när skillnaden i deformationsbeteende mellan materialen beaktas.

Modellen under framtagning kan reproducera temperaturberoendet hos duktiliteten hos koppar både med och utan fosfor (Cu-OFP, oxygen free phosphorus doped copper, respektive Cu-OF, oxygen free copper). Modellberäkningar visar också på att den höga krypduktiliteten hos koppar med tillsats av fosfor gäller även vid längre tider till brott, se figur 24-1. Som diskuterades ovan kan kavitetsmodellen även förklara inverkan av temperatur och spänningstillstånd på sprickpropageringshastigheten vid krypspricktillväxt. Särskilt inverkan av spänningstillståndet har tidigare varit svårt att beskriva utan att använda empiriska ansatser.

För att öka förståelsen av effekten av fosfor och andra ämnen, har en termodynamisk modellering gjorts av systemet koppar-väte-syre-svavel-fosfor (Magnusson och Frisk 2013). Lösligheter för väte, syre, svavel och fosfor har beräknats, och de mest stabila faserna har identifierats. Svavel finns i första hand i sulfider. Fosfor finns företrädesvis löst i kopparmatrisen, men också i fosfater, och där binds merparten av syret. Väte finns troligen i gasform, eftersom vätemängderna i Cu-OFP överstiger lösligheten av väte i kopparmatrisen och de mängder som kan finnas bundet i fosfat.

Flera studier har genomförts för att undersöka inverkan av väte på kopparmaterialet. I arbetet med att ta fram en metod för att väteladda koppar på ett kontrollerat sätt blev slutsatsen att katodisk laddning av stavar gav reproducerbara resultat. Laddning av folier på motsvarande sätt gav väldig spridning i resultaten troligen på grund av inverkan av ytans struktur. Termisk laddning gav i första hand en urgasning av väte, och vid högre temperaturer icke önskvärd korntillväxt (Martinsson et al. 2013). Väteinträngningen i stavarna analyserades med både en trestegsprofil med avsvavning och påföljande smältextraktion och med GDOES (Glow Discharged Optical Emission Spectroscopy). Resultaten från de båda metoderna var samstämmiga och visade på ett inträngningsdjup på 50 mikrometer (Martinsson och Sandström 2012). En diffusionsbaserad modell för väteinträngningen och bildningen av vätgasbubblor (porer) togs fram och har visats kunna beskriva mängden vätgas och bubblornas antal och yta (Martinsson och Sandström 2012). Modellen har också använts för att undersöka inverkan på väteinträngningen av laddintensitet, laddningstid, kornstorlek, samt kritisk radie för bildning av bubblor (Martinsson et al. 2013). Slutsatsen för kopparkapseln i förvaret är att väte från korrosion av koppar inte kommer att ge högre halter än 0,6 vikt-ppm (vilket är den gräns SKB satt för vätehalt i koppar) längre in än ett par hundra mikrometer med de kornstorlekar som är aktuella.



Figur 24-1. Krypörlängning (krypduktilitet) som funktion av temperatur för Cu-OF och Cu-OFP för en brottid på omkring 10 000 timmar (drygt ett år). Mätvärden jämförs med resultaten från modellen under framtagning, som baseras på initiering och tillväxt av kaviteter.

Som underlag till bättre förståelse av löslighet och diffusion av väte i koppar pågår ab initio-studier av struktur och bindingsenergi för komplex mellan vakanser och föroreningar i koppar. Preliminära resultat visar att upp till sex väteatomer kan bindas i en vakans. Om en syreatom binds på motsvarande sätt till en vakans kan högst en väteatom bindas. Däremot kan inte en vätgasmolekyl eller en vattenmolekyl rymmas i en sådan singelvakans, utan större defekter (till exempel korngränser) behövs för att så kallad vätesjuka ska uppstå.

Sammanfattningsvis har fundamentala modeller utvecklats för i) plastisk deformation, ii) krypning i grundmaterial och svetsar, iii) initiering och tillväxt av krypkaviteter, iv) spricktillväxt och v) inträngning av väte i koppar. Konstitutiva ekvationer har nu tagits fram även för svetsförband som använts för beräkning av den plastiska deformationen i kapslar. Dessa modeller där anpassningsbara parametrar inte används, utnyttjas för att beskriva kapselns uppträdande under mycket långa tidsperioder.

Program

För att ge en fördjupad förståelse för koppars materialegenskaper och därmed ett bättre underlag för analyserna av säkerhet efter förslutning kommer forskningsprogrammet inom materialegenskaper att fortsätta. Processen kryp i koppar är den centrala, men forskningen bedrivs (som tidigare) med flera inriktningar parallellt. De viktigaste insatserna omfattar:

- Vidare utredning av inverkan av vätes, syres, svavels och fosfors roll för kopparmaterialets egenskaper. Kopparmaterialets stabilitet undersöks med termodynamisk modellering, och även kinetiska aspekter av stabiliteten kommer att modelleras. Två specialframtagna kopparmaterial, med hög halt syre och svavel samt hög respektive låg halt fosfor, krypprovas. Vanlig kapselkoppar krypprovas under samtidig väteladdning (katodisk elektrolytladdning). De sistnämnda kan då jämföras med liknande experiment som utförts i Finland (Yagodzinskyy et al. 2012). Krypprovning genomförs också för att försöka kvantifiera korngränsglidningen i materialet, som jämförelse till den uppmätta korngränsglidningen vid dragprovning (Pettersson 2010).
- Ytterligare provning kommer att göras för att undersöka spricktillväxt och inverkan av långsam pålastning, med syfte att verifiera de framtagna krypmodellerna. Svetsat material, av material med den svetskvalitet som förväntas vid den förfinade svetsmetod som nu specificeras (se avsnitt 12.6 Förslutning och provning av svetsen) behöver därvidlag provas ytterligare. Likaså krypprovas koppar med inhomogen ljuddämpning.
- Möjligheterna att använda andra krypekvationer undersöks, särskilt för att se hur kallbearbetning av koppar bör tas in i modellerna, till exempel genom att inkludera kinematiskt och isotropt hårdnande. Vidare återstår arbete för att kunna implementera de fundamentala krypekvationerna i finita elementmodeller.

Utvecklingsarbetet med beräkningar (i första hand med finita elementmetoden) för fullstor kapsel (isostatisk last, inhomogen last, skjuvning, inklusive kryp av koppar) görs inom ramen för underlaget till PSAR, se avsnitt 12.3 Kapselutformning – analyser av kapseln.

24.2.4 Termisk expansion

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 bedömdes inte processen kräva något forskningsprogram, och processen kommenterades inte i granskningen.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

I sin granskning av SKB:s ansökan om slutförvaret för använt kärnbränsle i Forsmark begärde SSM förtydligande information angående skillnad i termisk expansion (SKBdoc 1323062, punkt 2, Skillnad i termisk expansion, C05). Ett klarläggande önskades i vilken utsträckning SKB i beräkningarna i avsnitt 3.4.4 i (SKB 2010o) tagit hänsyn till att lokala töjningar baserat på kapselns geometri samt defekter i det svetsade området (exempelvis JLH, joint line hooking) kan orsaka högre töjningsnivåer än den framräknade homogena töjningsnivån.

SKB lämnade ett förtydligande 2012-02-02 (SKBdoc 1333256) som visade att enbart termisk last inte ger några påkänningar på kapseln med det initiala gap som kapseln med referensutformningen har. Ytterligare redovisning med en integrerad analys av yttre laster, olika temperaturutveckling, inre gastryck och termisk expansion lämnas till SSM under 2013.

Program

Fortsatt arbete inom området ingår i arbetet som beskrivs i avsnitt 12.3 Kapselutformning – analyser av kapseln.

24.2.5 Deformation från inre korrosionsprodukter

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Miniatyrkapslar med förborrade hål (en millimeter i diameter) installerades i Äspölaboratoriet under 2006. Syftet med experimentet, som kallas Minican, var att undersöka hur vatten tar sig in i kapseln om det finns ett hål i kopparkölet samt hur korrosionsförloppet av insatsen utvecklas.

Fem miniatyrkapslar är monterade inuti varsin bur av rostfritt stål som håller den omgivande bentonitleran på plats. Kapslarna har också en uppsättning mätinstrument monterade inuti stålburen, men utanför kopparkapseln. Där finns bland annat elektroder för olika elektrokemiska mätningar för att följa korrosionsförloppet, samt noggrant invägda järn- och kopparkupong för efteranalys av massförlust (gravimetri) som ett direkt mått på faktisk korrosion. Tekniska detaljer kring experimentets utformning och utförande finns i (Smart och Rance 2009).

Fram till och med Fud-program 2010 hade ännu ingen kapsel tagits upp för analys. Däremot hade mätningar av grundvattenkemin (i såväl borrhål som kapsel) samt elektrokemiska mätningar pågått sedan experimentets start. De slutsatser som kunde redovisas i Fud-program 2010 var dels en relativt allmän ökning av koncentrationen järn(II)-joner, dels generellt sjunkande pH-värde. Vidare påpekades att båda dessa förändringar av vattenkemin skulle kunna vara resultat av mikrobiell aktivitet i experimentmiljön. En annan slutsats i Fud-program 2010 var att potentialerna sjunker i takt med att det syre som initialt finns i bentonitens porvatten förbrukas. Detta bekräftades även av gasanalyser. Resultaten från de elektrokemiska mätningarna (växelströmsimpedans, polarisationsmotstånd, elektrokemiskt brus samt resistans) av korrosionen för såväl järn som koppar har dock uppvisat orimliga och i vissa fall direkt själv motsägande resultat (så höga korrosionshastigheter att elektroderna vore fullkomligt upplösta).

I granskningen av Fud-program 2010 såg SSM positivt på SKB:s planer att ta upp en miniatyrkapsel för att jämföra gravimetrisk och elektrokemisk utvärdering av koppars korrosionshastighet.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

De kemiska och elektrokemiska mätningarna på kapslarna i Äspölaboratoriet har fortgått och ytterligare mätresultat har publicerats (Smart et al. 2011, 2012a). Kort kan sägas att den ökning av koncentrationen av järn(II)-joner som påpekades i Fud-program 2010 i vissa fall fortsatt och i andra fall varit närmast oförändrad. På motsvarande sätt har minskningen i pH i vissa fall fortsatt och i andra fall tycks den ha stannat av. I övrigt har inga större förändringar skett av vattnets kemi eller de elektrokemiska mätningarna.

För att utreda frågan om mikrobiell inverkan på experimentets förlopp har analys av mikrober och lösta gaser (som kan härröra från mikrobiell metabolism) utförts på vattenprover från såväl kapslar som borrhål (Lydmark och Hallbeck 2011). Ett av de viktigare resultaten är att sulfatreducerande bakterier (SRB) finns närvarande i experimentet samt att koncentrationen av dessa (kvantifierat som mest sannolika antal och angivet i antal celler per milliliter vatten) i utrymmet innanför bentoniten ökat sedan 2007. För ett experiment togs även ett vattenprov i borrhålet utanför bentonitbufferten. Det visade sig att koncentrationen av sulfatreducerande bakterier där var 100–1 000 gånger lägre än innanför bentoniten. Detta kan vara en konsekvens av att aktiviteten för de sulfatreducerande bakterierna är beroende av näringsämnen som finns i bentoniten (organiskt material) eller av vätgas som bildas när järnkomponenter (monterade innanför bentonitbufferten) i experimentet korroderar.

Sedan Fud-program 2010 har experiment 3 avbrutits, och kapseln har tagits upp och analyserats med avseende på bland annat korrosion av järn och koppar, förändringar i kapselns dimensioner samt förekomst av mikroorganismer (Smart et al. 2012b). Korrosionen av järninsatsen har varit ringa under den relativt korta tid experimentet pågått. Kapsel 3 hade två förborrade hål i kopparkapseln. Innanför vart och ett av dessa fanns urgröppningar i järninsatsen motsvarande cirka tio kubikmillimeter, i övrigt har det skett en relativt jämn korrosion av järninsatsens yta. Mätningar av kopparkapselns yttre dimensioner före och efter exponering visar ingen mätbar förändring (mät-noggrannhet $\pm 0,05$ millimeter). Likaså har mätningar av dragspänningar i kopparkapseln gjorts under hela experimentet utan att några förändringar kunnat påvisas (Smart et al. 2012b).

Den gravimetriska analysen av järnkupongen är viktig för att utvärdera korrosionsförloppet kvantitativt. Järnkupongen (en kubikcentimeter) har omvandlats fullständigt till korrosionsprodukt (framför allt järnsulfid). Inget metalliskt järn kunde påvisas vid efteranalysen (Smart et al. 2012b). Då korrosionen av järn varit omfattande på grund av mikrobiellt bildad sulfid, har en fällning av järnsulfid (FeS) bildats som en beläggning på såväl järn- som kopparytor i experimentet. Denna beläggning av järnsulfid har även bildats på de kopparelektroder som använts för att följa korrosionsförloppet elektrokemiskt, vilket är en möjlig förklaring till de motstridiga resultaten. Såväl impedans som polarisationsmotstånd i kopparelektroden påverkas av de elektriska egenskaperna hos ytbeläggningen av järnsulfid (Smart et al. 2012b).

I samband med brytningen av kapsel 3 provtogs kapselns olika delar, bentonitbufferten samt vattnet i borrhålet för mikrobiell analys. Analysen bekräftade tidigare provtagning och analys av vattnet. Sulfatreducerande bakterier förekommer i olika utsträckning på alla delytor (Hallbeck et al. 2012).

Program

Driften av Minican-projektet fortsätter i och med att kapslarna sitter i borrhålen. SKB planerar att avbryta och analysera kapsel 5 (utan bentonit) under 2013, samt kapsel 4 (kompakterad bentonit) under 2014/2015. För de två kvarvarande experimenten, kapsel 1 och 2, finns ännu inga konkreta planer. Då dessa har bentonit av samma kompakteringsgrad som kapsel 3 är de i dagsläget mindre intressanta att analysera.

24.2.6 Strålpåverkan

Gamma- och neutronstrålning kan inverka på materialegenskaperna hos koppar och segjärn. Strålningens inverkan på korrosion tas upp i avsnitt 24.2.8 Korrosion kopparkapsel.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 angavs i planeringen att de teoretiska studierna skulle fortsätta, framför allt med beräkningar av löslighet och diffusivitet av koppar i segjärn, samt med studier av mekanismerna för utfällning av koppar vid låga temperaturer, särskilt i samverkan mellan kopparkluster och vakanser. Experiment med bestrålning av segjärn planerades för validering av modellerna.

I sin granskning av Fud-program 2010 såg SSM positivt på SKB:s planer och kompletteringen med experimentella studier. Vidare ansåg SSM att SKB bör utreda om Late Blooming Phases (LBP) är en möjlig försprödningsmekanism för segjärnsinsatsen. Fenomenet har påvisats i reaktortankstål, där andra legeringselement (till exempel nickel, fosfor, mangan och kisel) ger försprödnings effekter som visar sig efter relativt lång tid och på så sätt att försprödnings hastigheten stiger markant efter viss tid i drift.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

För den experimentella delen har beräkningar genomförts för att undersöka hur produktionen av defekter i matrisen med hjälp av elektronbestrålning skulle kunna användas för att studera mobilitet och utfällning av koppar i järnmatrisen. Kinetiken måste accelereras med ökad dosrat. Den preliminära slutsatsen är att en elektronstråle med energin 2,5 megaelektronvolt (MeV) vid 175 °C skulle gå att använda. Proverna som kan bestrålas måste dock vara ganska små och det kan vara svårt att ta fram representativa prover från gjutna insatser. Det har också varit svårt att komma i gång med de planerade experimenten i Frankrike (via det franska nätverket för bestrålningsanläggningar, Emir).

Samverkan mellan vakanser och lösta ämnen (legeringselement eller föroreningar) i järnmatrisen har studerats med beräkningar av elektronstruktur, så kallade ab initio-beräkningar (Gorbatov et al. 2011a, b). Inverkan av magnetiskt tillstånd har undersökts med hjälp av extremfallen helt ordnat (ferromagnetiskt) och helt oordnat (paramagnetiskt). För koppar (och andra störämnesatomer) kan det konstateras att interaktionen mellan vakanser och störämnesatomerna är attraktiv och starkare vid högre magnetisk ordning. Detta stämmer överens med experimentella resultat där diffusionen av vissa störämnesatomer i järnmatrisen är högre än självdiffusionen hos järnet. Det magnetiska tillståndet har också stor inverkan på den elastiska anisotropin i järn och järn-kromlegeringar (Razumovskiy et al. 2011a, b). Med detta som underlag fortsätter arbetet med att studera löslighet och diffusivitet av koppar i järn.

Program

Eftersom det varit svårt att komma i gång med experiment med elektronbestrålning av segjärnsprover i Frankrike, har en förstudie beställts från Studsvik Nuclear för att mer förutsättningslöst ta fram en experimentplan.

Arbetet med modellering av järnets egenskaper kommer att fortsätta. För att undersöka om Late Blooming Phases kan uppträda i segjärnet används termodynamisk modellering av fasdiagram (Calphad, CALculations of PHase Diagrams) samt ab initio-beräkningar för fortsatt analys av interaktioner mellan lösta atomer och vakanser. Arbetet med ab initio-beräkningar kommer bland annat att beakta dislokationsdynamik (doktorandarbete på KTH, se avsnitt 24.2.2 Deformation av insats).

24.2.7 Spänningskorrosion hos insats

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 bedömdes inte processen kräva något forskningsprogram, och processen kommenterades inte i granskningen.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2010

I sin granskning av SKB:s ansökan om slutförvaret för använt bränsle i Forsmark begärde SSM 2011-12-19 förtydligande information (SKBdoc 1323062) om spänningskorrosion i den gjutna insatsen. Den direkta frågan gällde varför inte vatten i flytande form kan förekomma, vilket angavs i underlaget till SR-Site (SKB 2010o, avsnitt 3.5.3).

SKB lämnade ett förtydligande 2012-02-02 (SKBdoc 1333256) som dels korrigerade den icke uppdaterade uppgiften att vatten inte kan förekomma (uppgiften gällde kapslar förslutna med elektronstrålesvets), dels gav en förnyad analys. De väsentliga slutsatserna i denna analys är att inga studier som visar på spänningskorrosion på segjärn i nitratlösning har hittats i litteraturen (Reynaud 2009), utan eventuellt bildad salpetersyra ger i första hand allmänkorrosion. Den mekanism (slip-dissolution) som anses vara orsaken till spänningskorrosion på kolstål i koncentrerad nitratlösning (King 2010a) fungerar inte vid hög allmänkorrosion. För att spänningskorrosion ska uppstå krävs också dragspänningar i materialet. I förvaret kommer dragspänningar i insatsen att förekomma bara lokalt och i små områden (Dillström et al. 2010).

Program

Processen bedöms inte kräva något fortsatt forskningsprogram.

24.2.8 Korrosion kopparkapsel

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 redovisades resultat från ett flertal forskningsområden. Den fråga som gavs störst utrymme var den uppmärksammade diskussionen om huruvida koppar korroderar i rent vatten, där ingen entydig tolkning kunde göras av de olika experiment som genomförts. Andra områden som togs upp var morfologin hos växande kopparsulfidfilmer, eventuella skillnader i korrosionsbenägenhet

hos svetsad eller kallbearbetad koppar, mikrobiell sulfidproduktion i kompakterad bentonit, samt utvärderingar av om och hur elektrokemiska mätmetoder kan användas för att uppskatta korrosion i in situ-försök på Äspölaboratoriet.

Till granskningen av Fud-program 2010 ingavs ett flertal remissynpunkter på processen korrosion av kopparkapsel, vilka beskrivs i SSM:s granskningsrapport (SSM 2011). Här nedan sammanfattas SSM:s granskningssynpunkter samt Kärnavfallsrådets synpunkter.

SSM bedömde att mer forskning inom området kopparkorrosion i rent syrefritt vatten behövs för, att förståelsen av korrosionsmekanismen för koppar i rent syrefritt vatten ska kunna anses vara klarlagd. Dessutom behöver den föreslagna korrosionsmekanismens eventuella inverkan av aktuell grundvattenkemi utredas. SSM framförde att SKB bör försöka experimentellt verifiera korrosionshastighet för koppar för att ta fram ytterligare belägg till stöd för att koppars korrosionshastighet begränsas av masstransport av sulfid. Vidare angavs att SKB bör utreda samband mellan korrosionshastighet för koppar exponerad i laboratoriemiljö, arkeologiska fynd och eventuella naturliga analogier för, att koppla ihop teorier för kopparkorrosion med modeller för kopparkorrosion i slutförvarsmiljö. Korrosionsmekanismer under vätgasutveckling kan även leda till att kopparmetallen tar upp en del av den bildade vätgasen. I analysen bör även ingå en undersökning som klargör eventuell påverkan av förhöjd halt väte i kopparhöljet på kapselns mekaniska integritet.

SSM ansåg att ett område där mer forskning behövs är koppars korrosionsegenskaper för tiden från deponering fram till att återmättnad skett av omgivande buffertmaterial. SSM menade att radiolysens inverkan på korrosion av koppar bör belysas både före och efter det att den omgivande bufferten är mättad med vatten.

SSM framförde att SKB ytterligare bör utreda orsakerna till migration av korrosionsprodukter i bentonit och hur detta kan påverka den konceptuella modell som SKB använder för kopparkorrosion i säkerhetsanalysen. Dessutom bör exempelvis korrosionsprodukternas förekomstformer i bentonit samt bentonitens svällande och mekaniska egenskaper, undersökas ytterligare med avseende på koncentration av kopparkorrosionsprodukter i bentoniten. Eventuella förändringar av bentonitens egenskaper bör därefter ställas i relation till förvarets utveckling. SSM ansåg att SKB även bör karakterisera kopparkorrosionsprodukter på de kopparkapslar i prototypförvarsexperimentet i Äspölaboratoriet som man planerade bryta under 2011.

SSM såg positivt på arbetet som bedrivs för att studera risken för etablering av biofilmer med sulfat-reducerande mikrober på kopparhöljets yta och dess inverkan på kopparkorrosion. SSM framhöll att SKB bör belysa samverkan mellan olika typer av mikrober i förhållande till tillgången på olika energikällor.

SSM ansåg vidare att den elektrokemiska bedömningen av skillnader i korrosionshastigheten mellan svetsat material och grundmaterial behöver kompletteras med långtidsexponering. Detta för att gravimetriskt kvantifiera skillnaden i korrosionshastighet mellan svetsgods och grundmaterial.

Kärnavfallsrådet såg med tillfredsställelse på att SKB tar kopparkorrosionsforskningen på allvar och satsar mer på studier av kopparkorrosion, och noterade att experiment redovisas för en referensgrupp där kritiska forskare, miljöorganisationer och kommunrepresentanter ingår. Kärnavfallsrådet uttryckte vidare att studierna av kopparkorrosion under förvarsliknande förhållanden innebär att man vill undvika den problematik som hänger samman med tolkningen av resultat från mer kortvariga och begränsade laboratorieförsök. Det är viktigt att få fördjupad kunskap om utvecklingen av miljön i kompakterad bentonit och hela systemet i slutförvaret och hur detta påverkar korrosionshastigheten.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Det enskilda område inom kopparkorrosion som SKB satsat mest på gäller frågan om huruvida koppar korroderar i rent syrefritt vatten i en omfattning som långt överstiger vad kända kopparföreningars termodynamik förutsäger. Ett flertal nya studier har presenterats, men resultaten har ännu inte lett till en entydig tolkning av vad som händer med kopparn i rent vatten.

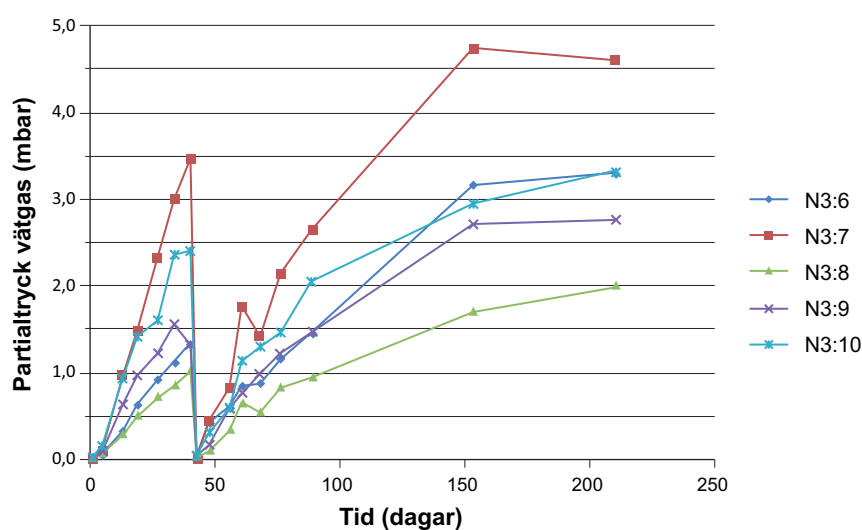
Experiment vid KTH med mätning av vätgasstryck har fortsatt och visar på ett vätgasstryck i millibarområdet (Hultquist et al. 2011, 2013). Det maximala vätgasstrycket som uppnås i ett slutet system ökar med ökande temperatur och författarna påpekar att det maximala trycket har ett liknande

temperaturberoende som koncentrationen av hydroxidjoner i jämvikten för vattnets autoprotolys (Hultquist et al. 2011). I Hultquist et al. (2013) presenteras studier av kopparytor som exponerats för syrefritt vatten. Korrosionsprodukter i form av oxidkorn i storlek upp till 0,5 mikrometer konstateras från studier med svepelektronmikroskopi (SEM), studier med fotoelektron-spektroskopi (XPS, X-ray photoelectron spectroscopy) indikerar en ytlig produkt som innehåller både hydroxid och oxid, medan sekundärjonmasspektroskopi (SIMS, secondary ion mass spectroscopy) visar på syre i de yttersta 0,3 mikrometer och väte längre in. Inga analyser av eller diskussioner kring koppars oxidationstal i produkterna presenteras. Vidare hade flera av kopparproverna långtidsexponerats för atmosfären före analys, vilket gör resultaten svårtolkade.

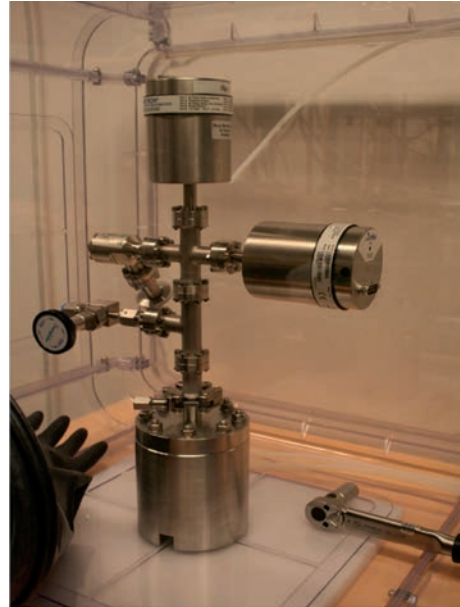
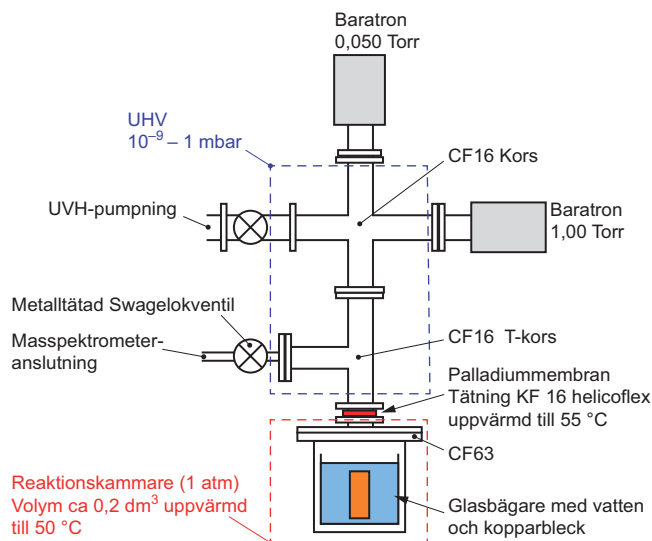
SSM har finansierat en studie i samarbete med Studsvik Nuclear, Aalto University i Helsingfors och VTT, Technical Research Center i Finland. Experimentet med en uppställning för mätning av vätgastryck i ett ultrahögvakuumssystem vid Studsvik Nuclear presenteras i Becker och Hermansson (2011). Resultaten visar att vätgas utvecklas i de två försöken med kopparbleck i rent vatten, medan ett försök med platinableck endast gav cirka 1/25 av denna vätgasutveckling. Mängden uppmätt vätgas är mindre än vad som motsvarar den mängd koppar som kunde uppmätas i vattenlösningen i experimenten med kopparbleck. Vattenlösningen innehöll ämnen som kan härröra från glasbägaren med koppar och vatten, medan andra metaller påträffades mer oväntat (koppar i platinaförsöket, samt koppar och palladium som kunde tvättas loss från glaset efter experimenten). Tryckförsöken avbröts efter cirka 500 timmar och inga ytterligare studier har genomförts med försöksuppställningen vid Studsvik Nuclear.

Försök som bedrivs på uppdrag av SKB har också påvisat vätgas. Det gäller försök dels med kopparbleck i vatten i provrör (Bengtsson et al. 2013), dels med koppar i vatten i en uppställning med ultrahögvakuum. Resultaten från utvecklingsarbetet med provrörförsöken visar på vätgasutveckling, upp till 6 millibar vid 70 °C. Det konstateras också att närvaro av syre förhindrar vätgasutvecklingen samt att vätgasutvecklingen fortsätter efter tömning av vätgasen. Ett exempel på vätgasutvecklingen från provrör med koppar och vatten visas i figur 24-2.

Försöken med ultrahögvakuum bedrivs vid Ångströmlaboratoriet vid Uppsala universitet. De omfattar både uppställningar med tryckmätningar (se figur 24-3) och analyser av kopparbleck i vatten i glasbägare förslutna med palladiummembran, utfört i handskbox med syrefri miljö. Kopparbleck som legat i ultrarent syrgasfritt vatten i sex månader, har analyserats med XPS och vattnet med masspektrometri (ICP-MS, inductively coupled plasma – mass spectroscopy). Från de preliminära resultaten från ytanalyserna kan varken envärd eller tvåvärd koppar konstateras. Syret som finns på ytan kan inte konstateras vara bundet till koppar, utan exempelvis till kol eller i vatten. Analyserna av vattnet visar på en kopparhalt på cirka 5–6 ppb, vilket motsvarar en koncentration av cirka 10^{-7} molar.



Figur 24-2. Partialtrycket för vätgas i experiment med koppar i vatten i provrör. Efter 40 dagar tömdes provrören på vätgas och ersattes med kvävgas, varefter mätningarna av vätgas fortsatte. Varje kurva avser ett provrör (provserie N3, se Bengtsson et al. 2013).



Figur 24-3. Experimentell uppställning för undersökning av koppars korrosion i rent vatten med ultrahög-vakuum.

För drygt 20 år sedan initierade Statens Kärnbränslenämnd ett försök med koppartrådar i vatten i ett provrör med palladiummembran. Provrören har sedan dess förvarats hos SP, dåvarande Statens Provningsanstalt och nu har koppartrådarna analyserats (Möller 2012). Analyserna kunde inte påvisa mer korrosion än den som uppmättes på motsvarande försök som bröts efter två år. Det kunde dock inte klarläggas hur genomsläppligt membranet varit för vätgas, eftersom provröret förvarats i horisontellt läge och membranet åtminstone delvis kan ha varit vätt av vattnet.

De elektrokemiska studierna av koppar i vatten har fortsatt, och en kinetisk modell innehållande två adsorberade specier har tagits fram (Bojinov et al. 2010, Betova et al. 2013a). Inget reducerbart skikt på kopparytan kunde konstateras under experimentet. Försök som pågått upp till fyra månader visar på elektrokemiskt mer aktiva egenskaper hos det absorberade skiktet, vilket dock sedan stabiliseras efter 2 000–2 500 timmar. Den kinetiska modellen har också utvidgats med lösligheten hos koppar(I) oxid och disproportioneringsjämvikten för koppar. Försök med klorid närvarande i lösningen har initierats (Betova et al. 2013b).

SKB fortsätter också sökandet efter eventuella okända kopparföreningar med syre och väte, genom både experiment och beräkningar. Kopperhydrid, CuH , har framställts med hjälp av hypofosforsyra från en koppar(II)-lösning och dess strukturella och optiska egenskaper har studerats med röntgendiffraktion och infrarödspektroskopi (FTIR, Fourier Transform Infrared spektroskopi) (Korzhavii et al. 2012). Kopperhydriden kan bevaras i kallt vatten, men är inte stabil i luft eller vakuum vid rumstemperatur. Kvantmekaniska beräkningar (DFT, density functional theory) har genomförts för att undersöka den termodynamiska stabiliteten hos olika konfigurationer av koppar-syre-väteföreningar. Beräkningar för koppar(I)oxid, koppar(II)oxid och kopperhydrid har genomförts och jämförts med experimentella termodynamiska data (Korzhavii och Johansson 2010, Korzhavii et al. 2011). Olika tänkbara konfigurationer för koppar(I)hydroxid har undersökts, och en struktur som påminner starkt om både den hos koppar(I)oxid och is har föreslagits (Korzhavii et al. 2012). Beräkningar visar att denna förening är metastabil och sönderdelas i koppar(I)oxid och vatten (Korzhavii och Johansson 2010). Olika sätt att framställa koppar(I)hydroxid har undersökts, och en erhållen produkt skulle kunna karakteriseras som en hydratiserad koppar(I)hydroxid, $\text{Cu}_2\text{O}\times\text{H}_2\text{O}$ (Soroka et al. 2013). I sammanfattning har dessa studier inte påvisat existensen av någon tidigare okänd koppar-syre-väteförening, som skulle kunna förklara vätgasutvecklingen som observerats från koppar i syrefritt vatten.

Reaktiviteten hos kopparytor i vatten har studerats. I en litteraturöversikt som genomförts (Johansson och Brinck 2012) har både experimentella och teoretiska studier gått igenom. Kvantmekaniska beräkningar (täthetsfunktionalteori) har genomförts för att studera dissociation av vatten och

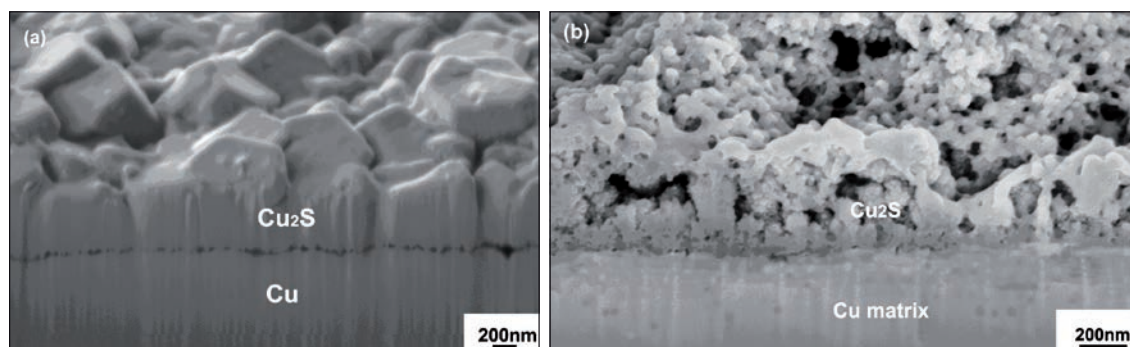
desorption av vätgas på den ideala [100]-ytan (Johansson et al. 2011). Slutsatsen från dessa studier är att ytreaktioner kan leda till bildning av vätgas i begränsade mängder. På en ideal [110] eller [100] kopparyta skulle 2,4 nanogram per kvadratcentimeter (ng/cm^2) vätgas kunna bildas om man antar att vattenklyvning och den vätgasbildande reaktionen fortgår till dess att ett monolager av hydroxylgrupper bildats. Om oxidationen fortskrider till ett monolager oxid, eller om hänsyn tas till en mikroskopiskt skrovligare yta kan detta öka, men knappast ens med en faktor 10. Detta är inte tillräckligt för att förklara vätgasutvecklingen som observerats från koppar i syrefritt vatten.

Ytterligare översiktsrapporter har tagits fram. Resultat från studier av egenskaper hos koppar(I)oxid och oxidation av koppar, framför allt den initiala oxidationen studerad på atomnivå, har sammanställts (Korzhavyi och Johansson 2011). En genomgång av publicerade resultat för korrosion i rent vatten presenterades på konferensen "The fourth International Workshop on Long Term Prediction of Corrosion Damage in Nuclear Waste Systems" i juli 2010 (King och Lilja 2011, Åkermark 2013, King et al. 2013a) och sammanställdes i december 2010 i en SKB-rapport (King 2010b). Som underlag till SR-Site har state-of-the-art-rapporten för kopparkorrosion uppdaterats (King et al. 2010b). Materialet finns också sammanfattat i King et al. (2013b). Beräkningarna av korrosion till SR-Site finns samlade i SKB (2010p).

Inverkan av gammastrålning på korrosion av koppar studeras i ett doktorandarbete på KTH. Experiment har utförts med kopparkuber i rent vatten under kvävgasatmosfär, vid stråldoser på 0,37 och 0,77 kGy/h. Ytorna och vattenlösningen har undersökts med olika spektroskopimetoder. De inledande studierna (Björkbacka et al. 2012, 2013) visar på högre korrosion för bestrålade prov än för obestrålade. Korrosionen visar sig både i form av bildning av koppar(I)oxid och som lokala kaviteter. Det måste dock påpekas att dessa dosrater är cirka 1 000 gånger större än maximal stråldos utanpå kapseln i förvaret, varför mer studier av mekanismen måste göras för att förstå hur resultaten kan extrapoleras till lägre dosrat.

Morfologi och filmtillväxt har studerats med elektrokemiska impedansmätningar och svepelektronmikroskopi för koppar i sulfidlösning vid olika koncentrationer (Chen et al. 2010, 2011a). Vid en högre koncentration (5×10^{-4} molar) blir filmen mer kompakt och fastsittande (se figur 24-4a). Filmen uppvisar en parabolisk tillväxthastighet, vilket indikerar att diffusion av koppar(I) genom filmen är hastighetsbestämmande. Med en låg sulfidkoncentration (5×10^{-5} molar) bildas en porös film (se figur 24-4b) vars tillväxt är nära linjär. Detta indikerar att tillväxten begränsas av diffusion av sulfiden i porerna på filmen (Chen et al. 2011b). Om sulfiden i lösningen utarmas blir diffusionen i lösningen hastighetsbestämmande.

Studien av bakterietäckningen på koppar- och titanytor i en miljö av kompakterad bentonit, mättad med grundvatten, har slutförts (Persson J et al. 2011). Frågeställningen gällde möjligheten till bildningen av en biofilm av sulfidbildande bakterier på koppar i kompakterad bentonit. Bakterieförekomst kunde detekteras, med en uppskattad maximal täckningsgrad på 3,7 procent. Detta kan anses vara i den nedre änden av vad som i andra kända system betecknas som en biofilm. Antalet bakterier var högre på titanytorna än på kopparytorna. Varken bentonitdensitet eller tillförsel av vätgas eller laktat, hade någon inverkan på mängden bakterier på ytorna. Bakterieaktiviteten i det cirkulerande vattnet ökade dock markant vid sådan tillförsel.



Figur 24-4. Tvärsnitt av kopparelektroder med kopparsulfid, bildad i syrefritt vatten efter 4 000 timmar. Lösningens sammansättning var a) 0,1 molar NaCl + 5×10^{-4} molar Na_2S , b) 0,1 molar NaCl + 5×10^{-5} molar Na_2S (Chen et al. 2011a).

Studierna med elektroderna från Lot-försöket i Äspölaboratoriet (försökspaket A2) har fortsatt med både ER-elektroder (ER=electric resistance) (Rosborg et al. 2011a), och elektrokemiska impedansmätningar (EIS, electrical impedance spectroscopy) (Rosborg et al. 2011b). ER-elektroderna har tagits upp och undersökts efter drygt fyra års drifttid (Rosborg et al. 2012). Korrosionsprodukterna bestod av kuprit (Cu_2O) och paratakamit ($\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$). Den genomsnittliga korrosionshastigheten var 3 mikrometer per år. Korrosionen var ojämnt fördelad över elektrodytan, men utan tecken på aktiv gropfrätning. Jämförelse mellan de olika typerna av elektroder (ER och EIS) har gjorts och båda typerna av mätningar kan användas för att följa korrosionshastigheten över tid, åtminstone i oxiderande miljö som i dessa försök. Mätningarna med elektroderna visar en sjunkande korrosionshastighet som med tiden blir mindre än 1 mikrometer per år.

Elektrokemiska realtidsmätningar av korrosionen i Prototypförvaret har gjorts via kopparelektroder monterade i bentonitbufferten vid ett flertal tillfällen mellan åren 2004 och 2010 (Rosborg 2013a). Dessa visar att korrosionen varit lägre än i genomsnitt 1,3 mikrometer per år. Tidigare erfarenheter från dessa mätmetoder samt korrigerering för oxidationstillstånd hos de faktiska korrosionsprodukterna (huvudsakligen Cu_2O) tyder på att den faktiska korrosionen snarare varit cirka 0,4 mikrometer per år. Det bör noteras att mätningar av potentialen i Prototypförvaret precis före återtag visar att den kemiska närmiljön varit mer eller mindre oxiderande under hela exponeringstiden, dock mildt oxiderande under 2010 (-30 till -60 millivolt mot standardvätgaselektrod). Efteranalys av en koppar-elektrod som suttit monterad i bentonitbufferten i deponeringshåll 5 visade att kuprit (Cu_2O) är den huvudsakliga korrosionsprodukten (Rosborg 2013b). Även malakit ($\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$) förekommer på elektrodens yta. Kopparelektroden uppvisar inga övertygande tecken på så kallad gropfrätning.

Ringan ovanpå locket på kapseln från deponeringshåll 5 har analyserats med avseende på lokal korrosion (Taxén et al. 2012). Svepelektronmikroskopi visar på förekomsten av upp till 6 mikrometer djupa gropar som kan vara lokala korrosionsangrepp. Utvärdering av betydelsen av dessa resultat försvåras av att kapselmaterialet inte karakteriserats före deponering. Den karakterisering som nu är gjord kan komma att tjäna som referenspunkt för framtida analyser av kapselytan på kapslar som legat deponerade i Prototypförvaret under längre tid.

Som beskrivs i avsnitt 24.2.5 Deformation från inre korrosionsprodukter, har en kapsel från projektet Minican återtagits och analyserats efter cirka fem års exponering i Äspölaboratoriet. Gravimetrisk analys av massförlusten hos en kopparkupong under försöksperioden gav en korrosion motsvarande 0,15 mikrometer per år, vilket är en storleksordning lägre än tidigare mätningar i Lot-experimentet (Karlund et al. 2009, 2011). Det är viktigt att påpeka att denna korrosionshastighet inte på något enkelt sätt kan användas för extrapolering i tid, eftersom en syrgashaltig period är inkluderad i mätningen samt eftersom en stor mängd sulfid producerats lokalt av mikroorganismer på grund av tillgången på vätgas från korrosion av järn. Inga tecken på lokala korrosionsangrepp har kunnat påvisas med optisk mikroskopi men ytterligare efteranalys av detta pågår.

I sammanfattning har betydande nya resultat erhållits kring i första hand koppars korrosion i rent vatten sedan Fud 2010. För detta område, liksom för andra korrosionsrelaterade frågor där framsteg gjorts, fordras dock ytterligare insatser för att nå slutsatser som blir direkt användbara i analysen av KBS-3-förvarets långsiktiga säkerhet.

Program

SKB:s studier av korrosion på koppar fortsätter, för att ge ytterligare kunskaper om detaljerna i korrosionsmekanismerna, vilket är nödvändigt med tanke på den centrala roll kapselns integritet har i säkerhetsanalysen. Fortsatt kommer de största insatserna att göras för studier av koppar i rent syrefritt vatten och väsentligen enligt samma linjer som i pågående arbete. Mätningarna av vätgasutveckling fortsätter både i högvakuum vid Uppsala universitet och i provrörsförsök. Kopplat till det görs analyser av vattenlösningar, kopparytor och andra exponerade delar av försöksuppställningarna. De elektrokemiska experimenten fortsätter, där mätning av vätgas är under utveckling.

Tänkbara koppar-syre-väteföreningar kommer fortsatt att studeras, experimentellt genom studier av metastabila föreningar (inklusive kopparhydrid) och teoretiskt genom kvantkemiska beräkningar. Ytterligare kvantkemiska studier kommer att genomföras för att bättre förstå reaktiviteten i gränsskiktet mellan koppar och vatten, och bland annat kommer inverkan av lösningsmedelseffekter på

reaktiviteten att undersökas. Referensgruppen för kopparkorrosion som arbetat under tre år kommer fortsatt att drivas med syftena att både ge SKB synpunkter på fortsatta experiment, framför allt experimenten vid Uppsala universitet, och att ge deltagarna insyn i SKB:s arbete med frågan.

Doktorandstudierna av inverkan av gammastrålning på korrosion av koppar fortsätter, med fokus på att förstå mekanismerna i oxidationen. Centralt är också att undersöka om något beroende av dos eller dosrat kan identifieras.

I de elektrokemiska studierna av koppar i sulfidlösning, ligger fokus på att bestämma platsen för katodreaktionen och att på olika sätt studera vad som bestämmer filmens bildning och egenskaper i lösningar med sulfid och högre halter klorid.

Sulfiders roll för korrosionen i förvaret studeras också i flera andra studier. En litteratursammanställning görs över lösligheten hos pyrit (FeS_2) i bentonit. Sulfidering av koppar(II)-föreningar undersöks med röntgenspektroskopi. Ytterligare ett försök görs för att avgöra om sulfatreducerande bakterier kan vara aktiva och ge sulfid i bentonit med olika kompakteringsgrad. Försöksupställningen har särskilt utformats för att undvika sulfidproduktion i den cirkulerande vätskefasen, vilket försvårat tolkningen av tidigare experiment.

Utvecklingen av elektrokemiska metoder för att undersöka skillnaden i korrosionsbenägenhet hos olika kopparmaterial (svetsat, kallbearbetat etc) fortsätter.

I analysen av kapsel 3 i Minican-projektet kunde inga lokala korrosionsangrepp identifieras med optisk mikroskopi, men man kan inte utesluta att så skett på en mindre skala. SKB planerar därför ytterligare efteranalyser av kopparmaterialet. I dessa kommer bland annat svepelektronmikroskopi (SEM) att användas. Analyserna kommer även att omfatta en utvärdering av eventuella effekter av spänningskorrosion.

Med anledning av begäran om kompletteringar till tillståndsansökan från SSM initieras också en probabilistisk analys av sannolikheten för lokal korrosion, inklusive hur en eventuell saltanrikning på kapselytan inverkar, se vidare avsnitt 24.2.11 Utfällning av salt på kapselytan, samt en kompletterande studie av inverkan på korrosion av jordströmmar, se vidare avsnitt 24.2.10 Jordströmmar – läckströmskorrosion.

24.2.9 Spänningskorrosion kopparkapsel

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 angavs i planeringen att forskningsprogrammet skulle fortsätta inom området spänningskorrosion, framför allt med experimentella studier i sulfidhaltig miljö och med simulerat grundvatten med ammonium.

I granskningen av Fud-program 2010 tog SSM upp försök gjorda vid VTT i Finland (Ari-Lahti et al. 2010), som påvisar att svavel kan diffundera in i korngränserna på koppar i artificiellt grundvatten innehållande sulfid. SSM bedömde att mer forskning behövs inom detta område för att klarlägga om sulfidinnehållande vatten kan orsaka sprödhetsfenomen i Cu-OFP. SSM ansåg vidare att SKB ytterligare bör utreda den geokemiska utvecklingen av olika ämnen och mikrobiell aktivitet som kan ge upphov till spänningskorrosion i koppar som funktion av tid.

Kärnavfallsrådet påpekade att spänningskorrosion oftast orsakas av restspänningar och ansåg att restspänningar bland annat av detta skäl måste mätas och analyseras noggrant, speciellt i svetsar hos kapseln.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

Den kritiska genomgången av föreslagna mekanismer för spänningskorrosion på koppar har slutförts (King och Newman 2010). Slutsatserna i studien är, som angavs redan i Fud-program 2010, att sannolikheten för spänningskorrosion under den inledande oxiderande perioden är låg på grund av avsaknaden av nödvändiga joner, och att det saknas en välgrundad mekanism för spänningskorrosion under reducerande förhållanden.

I ett samarbetsprojekt med Posiva har kopparmaterialets uppförande i simulerat grundvatten med ammonium studerats (Kinnunen och Varis 2011). Studierna utfördes som långsam dragprovning under potentialkontroll (simulering av oxiderande miljö i förvaret) med 0,1, 0,01 respektive 0,001 mol ammonium per liter. Bilder från svepelektronmikroskop (SEM) analyserades, liksom elektrokemiska impedansmätningar (EIS). Slutsatsen var att det enbart var vid den högsta halten ammonium (0,1 mol per liter) som spänningskorrosion kunde iakttas och då särskilt vid en potential strax över jämviktlinjen för $\text{Cu}^+/\text{Cu}^{2+}$. Vid lägre potential (där envärd koppar är stabil) och för de lägre ammoniumhalten kunde ingen spänningskorrosion noteras, utan brotten i dragprovningen var duktila. För de högsta potentialerna, där tvåvärd koppar är stabil och med 0,1 och 0,01 mol ammonium per liter i lösningen, förekom mer omfattande allmänkorrosion.

Hur risken för spänningskorrosion kan bedömas utgående från omgivande kemisk miljö diskuteras i underlaget till SR-Site, state-of-the-art-rapporten för kopparkorrosion (King et al. 2010, avsnitt 6.2.2.1). Möjligheten att använda tröskelvärden för koncentrationerna av nitrit, ammonium och acetat i analysen är begränsad, eftersom de då måste vara specificerade för många olika miljöer. Från tidigare studier har gränsen 0,001 mol per liter nämnts för nitrit (King et al. 2010) och i studien ovan (Kinnunen och Varis 2011) erhöles ingen spänningskorrosion vid 0,001 mol ammonium per liter. I SR-Site togs representativa grundvattendata fram för nitrit, ammonium och acetat, se avsnitt 6.1 i Data-rapporten (SKB 2010q), och dessa är som högst 0,0002 mol per liter (för ammonium under förhållandena ”submerged”, det vill säga under hav).

När det gäller spänningskorrosion och sprickbildning i koppar i sulfidhaltiga lösningar har arbetet vid VTT fortsatt inom det finska KYT-programmet. I experimentet har CT-provstavar belastats i simulerat grundvatten med 10, 100 och 200 milligram sulfid per liter. Den allmänna slutsatsen var att spänningskorrosion i sulfidhaltigt grundvatten vid rumstemperatur inte otvetydigt kunde påvisas (Ari-Lahti et al. 2011a). Inga säkra slutsatser kunde dras angående spricktillväxt under provningen (Ari-Lahti et al. 2011b). I studien analyserades också brottytan med optisk mikroskopi och SEM/EDS (svepelektronmikroskopi/energidispersiv röntgenspektroskopi), vilket visade på sulfidineslutningar i korngränserna och i högre mängd närmare sprickplanet (men inte bara där). Med ett inträngningsdjup på 10 millimeter på sex veckor skulle detta innebära en förhållandevis hög diffusionskonstant, i storleksordningen 10^{-11} kvadratmillimeter per sekund (mm^2/s) (Ari-Lahti et al. 2011a, b).

Analysen av CT-provstavarna har fortsatt med STEM-analyser (analyser med sveptransmissions-elektronmikroskop) av referensmaterial och material som varit i simulerat grundvatten med 200 milligram sulfid per liter (Pakarinen 2011). Alla proverna, såväl referensprover som material som varit sulfidhaltigt vatten, innehöll små svavelrika utfällningar, vilket dock uppträdde som hål i matrisen efter elektrolytpoleringen. Små mängder fosfor noterades i korngränser. I en korngräns hittades klor och andra grundämnen som finns i grundvattnet.

I ett ytterligare arbete inom det finska KYT-programmet (Ari-Lahti et al. 2012) har runda provstavar med anvisningar belastats i simulerat grundvatten med 10 milligram sulfid per liter och jämförts med obelastade flata provstavar. Provstavarna bröts upp genom utmattning i luft och brottyorna analyserades med SEM/EDS. Små mängder klorid, svavel, kalcium och kalium hittades på många ställen på sprickytorna, med ett inträngningsdjup på 1 millimeter per vecka. Sprickytorna var (upp till 30 procent) täckta av kopparoxider, både för belastad och obelastad provstav. Ingen tydlig inverkan på sträckgräns, brottgräns eller brottförlängning kunde konstateras efter exponering för sulfidhaltigt grundvatten. Som förklaring framför författarna hypotesen att sulfid reagerar med koppar och troligen skapar en väg för andra ämnen från grundvattnet i korngränserna, inklusive joner med syre från vattenmolekyler som skulle reagera och ge kopparoxid. Hur detta samspel mellan sulfidjoner (i lösning eller i form av kopparsulfid) och syreinnehållande joner skulle gå till beskrivs dock inte i detalj.

För att undersöka spänningskorrosion i sulfidhaltigt vatten vidare, och för att kunna jämföra med ovanstående finska studier, liksom de tidigare japanska försöken (Taniguchi och Kawasaki 2008) har SKB utfört en experimentell studie (Bhaskaran et al. 2013). Där har koppar provats med långsam dragprovning, konstant töjningsprovning, elektrokemiska analyser och ytanalyser, liksom undersökning med EBSD (diffraction av tillbakaspjidda elektroner) av orienteringseffekter hos kornen. Även inverkan av anodisk eller katodisk polarisation testades. Analyserna gjordes i 5–50 millimolar sulfidlösning (motsvarar 0,16–1,6 milligram sulfid per liter) med natriumklorid eller simulerat grundvatten, vid 25 och 80 °C. Inte i något fall kunde spänningskorrosion konstateras. Korrosionsprodukterna var

i allmänhet porösa och kunde lätt tas loss, men även finkorniga, kompakta korrosionsprodukter som satt fast förekom. En viss korrelation mellan tunna filmer och (100)-orientering på ytan hos kornen kunde iaktas, men inga definitiva slutsatser kunde dras. Resultaten är svårtolkade, särskilt med hypotesen att korrosionen bestäms av indiffusionen av sulfid till kopparytan. Inom det sistnämnda området har dock nya rön kommit fram, som visar på olika hastighetsbestämmande steg beroende på sulfidkoncentrationen, se avsnitt 24.2.8 Korrosion kopparkapsel.

Sammanfattningsvis kan det konstateras att flera grupper på olika sätt försökt upprepa de japanska försöken, men inte kunnat konstatera någon spänningskorrosion. Det finns dock frågetecken kring hur de experimentella iakttagelserna ska tolkas och vad som egentligen hänt i experimenten.

Restspänningar i kopparkapseln behandlas i avsnitt 24.2.3 Deformation kopparkapsel vid yttre övertryck.

Program

Forskningsprogrammet för spänningskorrosion på koppar fortsätter, framför allt inriktat på grundvatten innehållande sulfid. Ytterligare experiment behövs, eftersom de hittillsvarande resultaten och tolkningarna är motstridiga. Fokus blir att undersöka om spänningskorrosion kan uppträda i en miljö som liknar slutförvarsmiljön, även om vissa insatser för att upprepa och om möjligt förklara andra svårtolkade experiment förutses.

En pågående efteranalys av den återtagna kapseln från Minican-försöket kan komma att ge ytterligare kunskap om huruvida spänningskorrosion förekommer i koppar i sulfidhaltigt grundvatten.

För studier av den geokemiska utvecklingen och inverkan av mikrobiell aktivitet hänvisas till avsnitt 26.17 Mikrobiella processer, där litteraturstudier av acetogener tas upp.

24.2.10 Jordströmmar – läckströmskorrosion

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 angavs inget forskningsprogram för processen och processen kommenterades inte i granskningen.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2010

Processen behandlas i SR-Site i Processrapporten för bränsle och kapsel, (SKB 2010o, avsnitt 3.5.6). Analysen omfattade en uppskattning av potentialgradienter i Forsmarksområdet, som underlag till korrosionsbeskrivningen. Mätningar i avpackade borrhål användes som en approximation för omättad bentonit (med hög elektrisk resistans) och gav cirka 0,5 volt över fem meter. Som approximation för mättad bentonit användes data från öppna borrhål, vilket gav typiskt 0,05 volt, i vissa fall upp till 0,25 volt.

Olika tänkbara korrosionsreaktioner i närvaro av ett pålagt elektriskt fält diskuteras och slutsatsen var att med de här potentialdifferenserna över kapseln kommer korrosionen fortfarande att vara begränsad av de mängder syre (begränsar katodreaktionen) och sulfid (begränsar anodreaktionen) som når kapseln. Reduktion av vatten under bildning av koppar(I)oxid begränsas av löst vätegas som finns i grundvattnet vid dessa potentialdifferenser. Marginalerna mot lokal korrosion minskar med pålagt elektriskt fält, men ökar med sjunkande syrgaskoncentration.

En mindre studie med mätningar av polarisationsmotstånd i övergången mellan mättad bentonit och koppar i syrefri miljö gjordes i en tidigare ansats att bedöma jordströmskorrosion med jämförelser av olika typer av elektriskt motstånd i förvaret (Taxén 2011). Mätningarna med växelströmsteknik gav inga användbara resultat, medan mätning med likström gav ett polarisationsmotstånd på 3 100 ohm-kvadratmeter (Ωm^2).

Program

SKB planerar en uppdatering av analysen, särskilt med avseende på fallet med delvis mättad bentonit samt med resultat från de nya studier med probabilistiska analyser av lokal korrosion som planeras, se avsnitt 24.2.8 Korrosion kopparkapsel.

24.2.11 Utfällning av salt på kapselytan

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 angavs inte något forskningsprogram för processen.

I sin granskning av Fud-program 2010 framförde SSM att det är fullt möjligt att kapslar kan komma att utsättas för atmosfärsliknande förhållanden med en gasspalt mellan kopparhöljet och buffertmaterialet, särskilt vid låg grundvattenströmning och därmed lång återmättnadstid hos bufferten. Av denna anledning ansåg SSM att SKB bör utreda under vilka förhållanden saltutfällning kan ske på kopparytor och dess eventuella påverkan av korrosion på kopparhöljet.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2010

Hur korrosion under omättade förhållanden behandlas i SR-Site finns beskrivet i underlagsrapporterna Processrapporten för bränsle och kapsel (SKB 2010o, avsnitt 3.5.7) och den uppdaterade state-of-the-art-rapporten om kopparkorrosion (King et al. 2010, avsnitt 4.3.2). Där bygger analyserna på samma underlag som redovisades i Fud-program 2007. Slutsatsen var att osäkerheterna mer ligger i utfällningen av salter än salters inverkan på själva korrosionen.

Program

Studier av ångtransport i spalten mellan kapseln och bentoniten beskrivs i avsnitt 25.5.5 Vattentransport under omättade förhållanden.

SKB planerar utvidgade studier av lokal korrosion med probabilistiska analyser, se avsnitt 24.2.8 Korrosion kopparkapsel.

25 Buffert och återfyllning

I detta kapitel behandlas forskning kring den långsiktiga funktionen hos de lerbarriärer SKB har utvecklat för slutförvaren. Återfyllningen i tunnarna är numera definierad som en barriär i KBS-3-konceptet. Viss forskning som beskrivs i kapitlet rör även lerbufferten i silon i SFR. Där så är fallet anges detta särskilt i texten.

25.1 Buffert

Buffertens huvudfunktion är att begränsa vattenflödet runt kapseln. Detta åstadkoms genom låg hydraulisk konduktivitet, vilket medför att diffusion blir den dominerande transportmekanismen, samt genom ett svälltryck som leder till att bufferten blir självförslutande. Bufferten ska också hålla kapseln på plats i deponeringshålet, dämpa bergets skjuvrörelser och bibehålla sina egenskaper under den tidsperiod som analyseras. Bufferten ska dessutom begränsa den mikrobiella aktiviteten på kapselns yta och filtrera kolloidala partiklar. Bufferten ska inte signifikant försämra övriga barriärens funktion. Kvantitativa konstruktionsförutsättningar ges i SKB (2009a) och finns dokumenterade i avsnitt 13.1.1 Buffert.

Vattenmättnaden och svällningsprocesserna utgör en del av buffertens långsiktiga utveckling och kan inte kontrolleras vid initialtillståndet. Utifrån analyser av dessa processer kan det i stället ställas krav på initialtillståndets geometri och densitet.

25.2 Återfyllningens krav och funktioner

Återfyllningen är nödvändig för att bufferten och berget ska få önskad funktion. De krav som ställs på återfyllningen finns listade i avsnitt 13.1.2 Återfyllning och plugg.

25.3 Bentonitbarriären i silon i SFR

Bentoniten i SFR är en integrerad del av barriärsystemet i SFR och analyseras i SR-PSU. Forskningsprogrammet för bentoniten i SFR presenteras tillsammans med bufferten i detta avsnitt.

Kraven på buffertmaterialet i silon i SFR är (Pusch 1985):

- Vattengenomströmningen ska vara obetydlig.
- Gas ska kunna avledas så att uppkomsten av lokala gasblåsor med mycket höga tryck förhindras.
- Homogeniteten ska vara hög.
- Materialets egenskaper ska bevaras under lång tid.
- Trycket från buffertmassan får inte under något skede: byggnadstid, avfallsdeponering eller efter förslutning, ge upphov till oacceptabla deformationer hos betongkonstruktionen.

Silon i SFR är omgiven av en bentonitbuffert som är placerad mellan betongkonstruktionen och bergväggen. Produktnamnet är GEKO/QI och det är ett sodaaktiverat material.

25.4 Initialtillstånd

25.4.1 Översikt

Buffertens initialtillstånd är det tillstånd som råder när hjälputrustningen som användes vid installationen har avlägsnats och buffertens alla beståndsdelar har installerats i deponeringshålet.

Grundvatteninflöde i deponeringshålet och hur det påverkar bufferten beaktas inte för initialtillståndet. De buffertegenskaper som ska överensstämja med konstruktionsförutsättningarna och som är relaterade till den långsiktiga säkerheten är:

- Materialsammansättning.
- Installerad densitet.
- Installerad geometri.

Dessa egenskaper beror i viss utsträckning av varandra. Densiteten bygger till exempel på en given materialsammansättning.

Egenskaperna har traditionellt bestämts som ett medelvärde för ett helt deponeringshål. Detta förutsätter dock att de installerade komponenterna (block och pelletar) och kvarvarande tomrum homogeniseras till en tillräcklig nivå. Det är därför nödvändigt att analysera hur den installerade konfigurationen kommer att utvecklas i förvaret för att kunna ge feedback till kraven på de installerade buffertegenskaperna. Detta diskuteras i avsnitt 25.4.4 Bentonitsammansättning och 25.5.9 Svällning.

I processrapporten för bufferten, återfyllningen och förslutningen (SKB 2010m) beskrivs bufferten med hjälp av ett antal variabler. De flesta av dessa variablers värden för initialtillståndet bestäms av egenskaperna, vilket visas i tabell 25-1.

Tabell 25-1. Variabler för bufferten och återfyllningen.

Variabel	Egenskap	Initial-tillstånd	Definition
Vatteninnehåll	Materialsammansättning		Vattenhalt som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.
Gasinnehåll	Materialsammansättning		Gashalter (inklusive eventuella radionuklider) som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.
Bentonitsammansättning	Materialsammansättning		Den kemiska sammansättningen av bentoniten (plus eventuella radionuklider) i tid och rum i bufferten. Detta inkluderar också föroreningar och andra mineral än montmorillonit.
Montmorillonitsammansättning	Materialsammansättning		Montmorillonitens kemiska sammansättning (inklusive eventuella radionuklider) i tid och rum i buffert och återfyllning. Även material sorberat till montmorillonitytan ingår i denna variabel.
Porvattensammansättning	Materialsammansättning		Porvattnets sammansättning (inklusive eventuella radionuklider och lösta gaser) i tid och rum i buffert och återfyllning.
Hydrovariabler (tryck och flöden)	Materialsammansättning		Flöden och tryck för vatten och gas som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.
Spänningstillstånd	Installerad densitet		Tryck som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.
Porgeometri	Installerad densitet		Porgeometri som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning. Ofta anges porositet, det vill säga den andel av volymen som inte upptas av fast material. I denna variabel ligger också buffertens densitet.
Buffertgeometri	Installerad geometri		Geometrisk mått för buffert och återfyllning. En beskrivning av bland annat begränsningsytor inåt mot kapseln och utåt mot geosfären.
Strålningsintensitet	–	Beräknad	Intensitet av alfa-, beta-, gamma- och neutronstrålning som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.
Temperatur	–	Beräknad	Temperatur som funktion av tid och rum i buffert och återfyllning.
Strukturella och kvarlämnade material	–		Sammansättning av eventuella konstruktionsmaterial i deponeringshålen.

25.4.2 Vatteninnehåll

I SR-Site antas de kompakterade buffertblocken ha en initial vattenkvot på 17 procent, vilket ger en vattenmättnadsgrad i blocken på mellan 75 och 85 procent. Pelletarna i spalterna mellan bufferten och berget antas ha en initial vattenkvot på tio procent, vilket ger en vattenmättnadsgrad på cirka 15 procent om inte spalten fylls med vatten. Spalterna mellan bufferten och kapseln, samt mellan bufferten och berget, kan eventuellt fyllas med vatten, men i SR-Site antas att de är torra.

Den initiala vattenhalten har ingen direkt betydelse för förvarets långsiktiga funktion. Däremot påverkar den hur buffertblock och pelletar kan tillverkas, hanteras och lagras (detta diskuteras i kapitel 13 Teknikutveckling buffert, återfyllning och förslutning).

25.4.3 Gasinnehåll

Den initiala gashalten följer ur vattenhalten och porositeten. Om bentonitblocken har en vattenmättnadsgrad som är mellan 75 och 85 procent, betyder det att 75 till 85 procent av porvolymen är fylld med vatten och återstoden med luft, det vill säga gashalten (räknad som volym gas delat med total volym porer) är mellan 15 och 25 procent. I dagsläget är avsikten att inte fylla den pelletfyllda spalten mellan block och berg med vatten, vilket innebär att gashalten i bufferten är cirka 85 procent. Luften i ett deponeringshål upptar cirka 16 procent av totala volymen buffert. Osäkerheterna i initiala gashalter är inte betydelsefulla för den långsiktiga säkerheten.

25.4.4 Bentonitsammansättning

Bentonit är beteckningen på ett naturligt förekommande lermaterial som är rikt på montmorillonit och har variationer i sammansättningen beroende på bildningssättet. Ofta förekommer bentonit i flera specifika lager, mellan vilka sammansättningen kan variera. I kommersiella produkter, till exempel MX-80, blandas vanligen material från olika lager för att uppfylla specificerade kvalitetskrav.

Bufferten i silon i SFR består av ungefär 6 000 kubikmeter GEKO/QI, vilket är en natriumkonverterad kalciumbentonit. Kravspecifikationen säger att montmorillonithalten ska vara minst 65 procent.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SSM såg positivt på att SKB har tagit fram kriterier för halterna av svavel och kol i bufferten. SSM ansåg att SKB bör utreda om det finns behov att även ta fram kriterier för halter av andra ämnen som kan påverka buffertens pH och redoxbuffring.

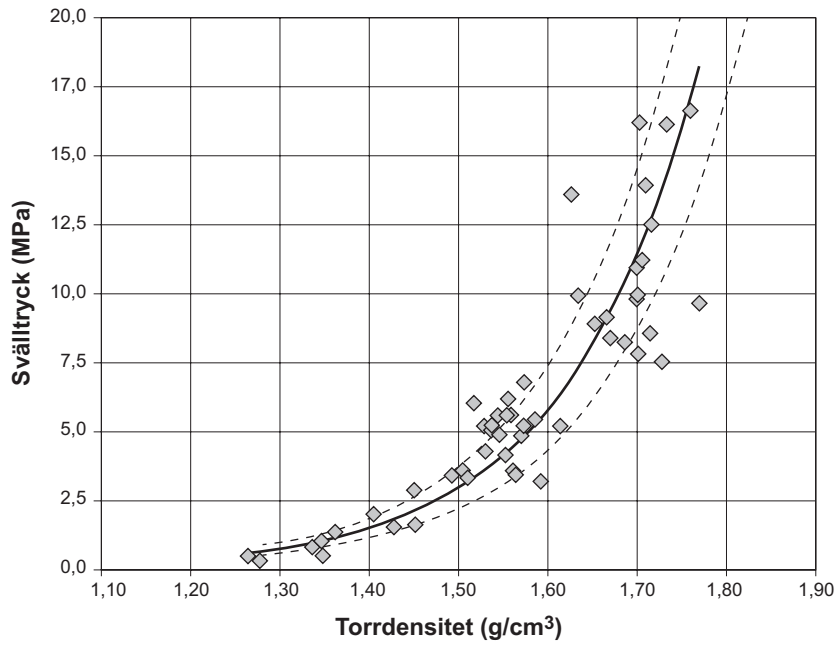
Vidare ansåg SSM att det är otillräckligt att enbart förlita sig på enkla acceptanskriterier som grund för materialval. Huruvida andra materialegenskaper som inte täcks in av kriterierna saknar betydelse för funktionen i slutförvaret beror helt på hur stora variationer som kan finnas mellan tänkbara materialval.

I NEA-granskningen av SR-Site (NEA 2012) poängterar granskningsgruppen vikten av att utvärdera skillnader mellan olika kommersiella bentoniters egenskaper när det gäller tätningsförmåga, piping och erosionsstabilitet.

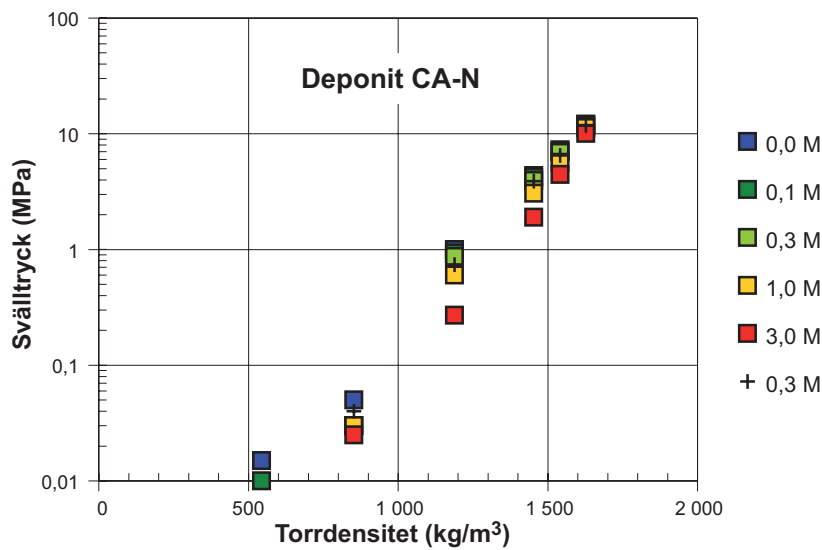
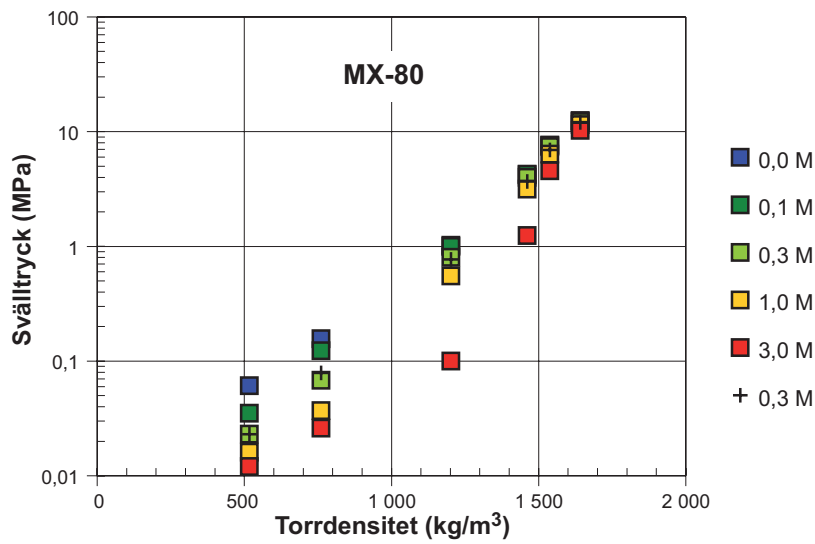
Nyvetenskap sedan Fud 2010

De kommersiella bentoniter som är intressanta som buffertmaterial har en förhållandevis konstant sammansättning. Smektithalten (huvudsakligen montmorillonit) ligger normalt på cirka 80 procent. För att kravet på densitet för bufferten ska vara relevant, behövs en montmorillonithalt i intervallet 75–90 procent. I SKB (2010f) har ett krav på en halt på 80–85 procent definierats. Bentonitmaterial för blocktillverkning kommer att genomgå en omfattande kvalitetskontroll före pressning. Vid den kontrollen bestäms bland annat montmorillonithalten (se kapitel 13 för planer).

Olika bentoniter kan dock ha olika svälltryck för en given densitet. Om man jämför data för Febex (figur 25-1) med data för MX-80 och Ibeco-RWC (figur 25-2) så ser man att Febex inte ger ett högre svälltryck för en given densitet trots att montmorillonithalten är högre. Detta gör att den enkla definitionen för montmorillonithalt och densitet, som SKB tidigare har använt, inte är allmängiltig.



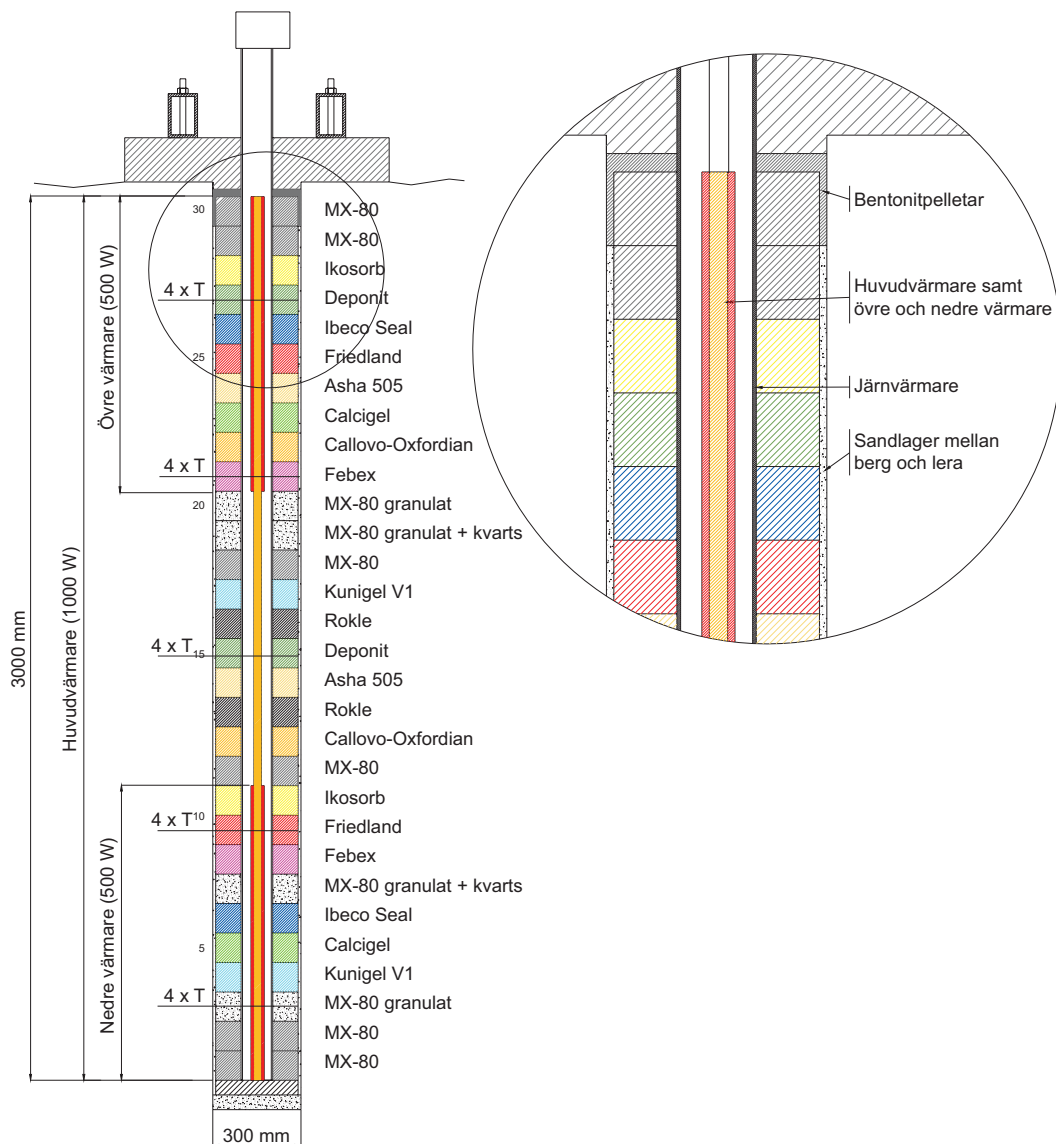
Figur 25-1. Svälltryck för Febex-bentonit som funktion av torrdensitet mätt med avjonat vatten (Villar 2002).



Figur 25-2. Svälltryck för MX-80 i natriumkloridlösning och för Ibeco-RWC (Deponit CA-N) i kalciumkloridlösning (SKB 2006c).

Vid val av buffertmaterial ska därför materialspecifika samband mellan densitet och svälltryck respektive densitet och konduktivitet upprättas. Utifrån dessa kan materialspecifika krav på densitet och montmorillonithalt härledas.

I försöket med alternativa buffertmaterial (ABM) testas och jämförs dryga tiotalet bentoniter mot varandra för att kunna optimera valet av buffertmaterial. Detta görs framför allt utifrån parametrarna: tillgänglighet, säkerhet och kostnad. Principutförningen av ABM visas i figur 25-3. De hydromekaniska testerna av materialet har visat en stor variation på de levererade lerorna. Flytgränsen varierade från 68 procent (Friedland) till 545 procent (MX-80) och korndensiteten låg runt 2,7 gram per kvadratcentimeter (g/cm^2) med undantag för de mer järnrika leror som låg mellan 2,8 och 2,9 g/cm^2 . De flesta lerorna hade hög katjonutbyteskapacitet (CEC), vilket är typiskt för bentonitleror. Extraherbara salter i form av klorider och sulfater varierade mellan lerorna och upp till 0,3 viktprocent klorid och 0,5 viktprocent sulfat uppmättes. Kemisk extraktion med CBD-metoden (citrat-bikarbonat-ditionit) gav i vissa fall förutom höga järnhalter också förhöjda halter av mangan och kisel. Denna förhöjning av kisel (till exempel Calcigel, Rokle) kopplade inte till mängden kvarts detekterad med röntgendiffraktion, vilket indikerar förekomsten av amorft silika i vissa leror. Mineralfaserna bestämdes semikvantitativt med röntgendiffraktion och stämde grovt väldigt bra mot respektive elementaranalys (ICP/AES).

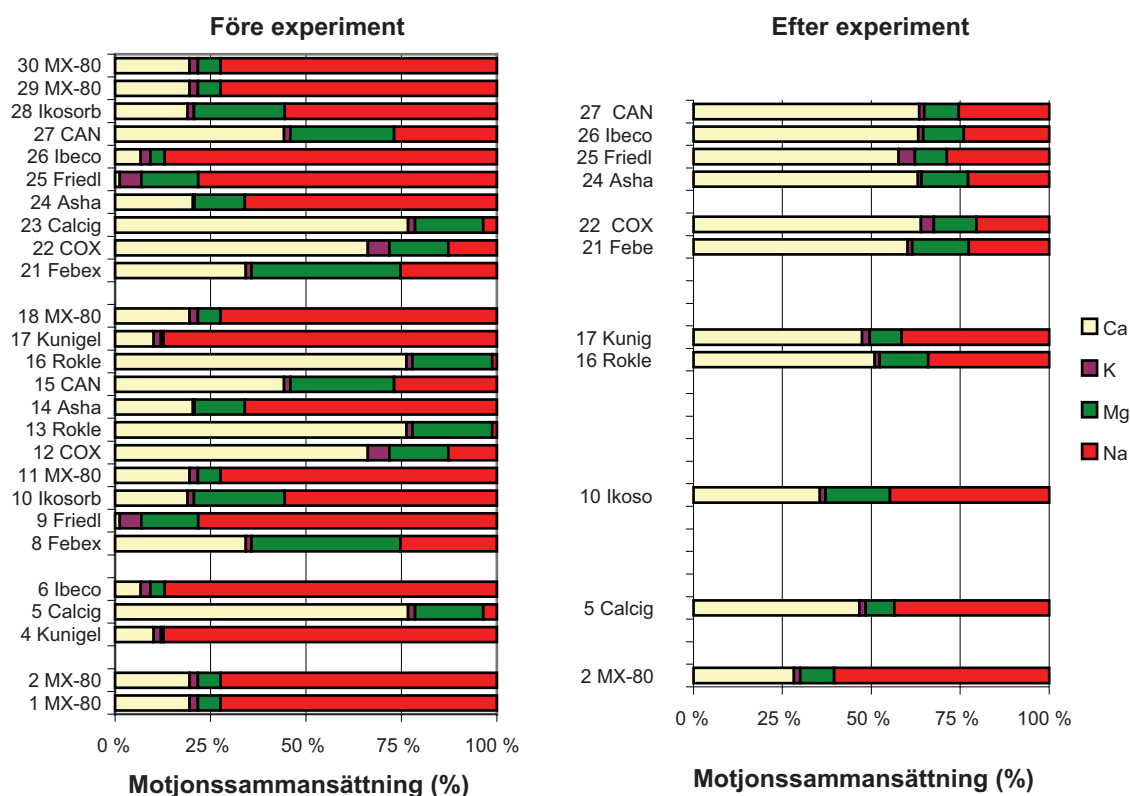


Figur 25-3. Principutförning av de paket som använts i försöket med alternativa buffertmaterial (ABM). Varje paket innehåller tiotalet leror och totalt har sex försökspaket installerats på 400 meters djup i Äspö-laboratoriet.

Förekomsten av mikrober varierade starkt mellan de olika lerorna. Kunigel var i princip steril medan Friedland och IbecoSeal innehöll stora mängder av alla typer av undersökta mikrober. Järnreducerande bakterier upptäcktes i samtliga leror i varierande mängd och små mängder sulfatreducerande bakterier upptäcktes i ungefär hälften av materialen.

Ingen skillnad i hydraulisk konduktivitet observerades mellan referensproverna och prover från ABM-paket 1. Däremot hade både Asha 505 och Deponit CA-N ett lägre svälltryck efter försökets gång, vilket eventuellt kan kopplas till att ett jonbyte ägt rum. Koncentrationen av klorid i lerorna var jämnt fördelad både radiellt och vertikalt i försökspaketet. Vissa leror visade på en anrikning av sulfat mot den varmare delen. Motjonsammansättningen var relativt konstant radiellt inom lerorna, men varierade starkt vertikalt genom paketet, se figur 25-4. Den övre delen av paketet hade betydligt mer kalcium än den lägre delen, vilket förklarades med en större interaktion med det kalciumrika Äspövattnet i den övre delen på grund av fler vattenförande sprickor. De undersökta lerorna visade på en magnesiumanrikning mot den varmare innerdelen, vilket inte kunde kopplas till någon identifierad fas. Pulverröntgendiffraktion på lerprover kunde inte detektera någon montmorillonitombvandling. Undantaget var några prover som varit i direkt kontakt med järnvärmaren, där det fanns indikationer på förekomst av trioktaedrisk lermineral. Kraftiga artefakter observerades i kontakten mot värmaren på grund av det smörjmedel man använt vid blockpressningen, vilket skapade osäkerheter. Låga nivåer av mesofila bakterier kunde upptäckas i några prover efter försökets gång, alla andra mikrob-sorter var under detektionsnivån, vilket visar på att mikrober, som potentiellt är korrosiva eller buffert-degraderande, inte kunde överleva denna hårda testmiljö (130 °C) (Svensson et al. 2011).

Ett arbete har påbörjats att vidareutveckla den interna kompetensen på SKB när det gäller bentonit-karakterisering och provtagning, samt att bygga upp ett lerlaboratorium. Detta har gjorts i form av ett kunskapsöverföringsprogram, som i sin första del fokuserat på grundläggande kemisk och mineralogisk karakterisering. En leverans av en indisk lera för återfyllning har analyserats på ett konsultföretag parallellt med att den analyserats av SKB:s personal på Äspölaboratoriet. Analysresultaten har därmed löpande kunnat jämföras. De analyser och tekniker som genomfördes var katjonutbyteskapacitet, jonbyte och upprening av lerfraktion och pulverröntgendiffraktion. Det samlade resultatet rapporteras under 2013.



Figur 25-4. Relativ katjonfördelning i ABM-paket 1 före och efter försökets gång. Notera att kalcium anrikades i paketets övre del (Svensson et al. 2011).

Under hösten 2012 installerades tre nya ABM-paket som en del av SKB:s långsiktiga experiment-program. Paketerna var mycket snarlika de ursprungliga ABM-paketerna som installerades 2006. Några leror som inte var riktiga bentoniter (Friedland och Callovo-Oxfordian) togs bort och ersattes av nya bentoniter eller en bentonitliknande lera (saponit). Saponit är ett annat svällande lermineral än montmorillonit, som vanligtvis finns i bentonit. Saponit togs med av vetenskapliga skäl och inte för att det skulle vara ett potentiellt buffertmaterial.

Vid analyser av tidigare fältförsök med bentonit har man upptäckt att det smörjmedel som används vid blockpressningen skapar osäkerheter kring vad som egentligen händer precis i kontakten mellan kapsel och lera. Därför frästes 1–2 millimeter bort av lerblockens insida som är i kontakt med järnvärmaren, och ett antal 24 millimeter höga kopparkutsar borrades in i utvalda lerblock, se figur 25-5. I KBS-3H-konceptet, se kapitel 16, och internationellt finns planer på att ersätta järn med titan, då titan förväntas påverka bentoniten i mindre omfattning. Därför installerades också små titanrör i utvalda lerblock.

Program

Samtidigt som valet av buffert och återfyllningsmaterial behöver optimeras så behöver också de grundläggande karakteriseringsmetoderna som avses användas vid leveranskontroll av bentoniten (Karnland 2010) optimeras. Metoderna ska optimeras med avseende på hastighet, noggrannhet och precision. Detta görs för att på ett industrialiserbart sätt kunna analysera tillräckligt stora mängder lera med tillräcklig noggrannhet så att kravparametrarna kan garanteras vara uppfyllda.

Detta är av vikt för vidareutvecklingen av konstruktionsförutsättningarna, eftersom den statistiska variabiliteten i materialkvaliteten har en direkt koppling till de önskade buffertegenskaperna. Toleransen i kravet på buffertdensitet måste anpassas till den förväntade variabiliteten i montmorillonithalt.

Detta arbete fortsätter som ett materialprojekt med inriktningen att öka den interna kompetensen för att självständigt kunna genomföra de kritiska analyserna inför driften av slutförvaret för använt kärnbränsle. Arbetet beskrivs även i avsnitt 13.3 Materialstudier bentonit och brygger mellan teknikutveckling och forskning. SKB bygger upp verksamheten vid Äspölaboratoriet med målet att självständigt genomföra så stora delar av kontrollprogrammet som möjligt. Under 2013 etableras ett röntgenlaboratorium på Äspölaboratoriet med syfte att karakterisera den mineralogiska sammansättningen i leran med pulverröntgendiffraktion (XRD) och lerans kemiska sammansättning med röntgenfluorescensspektroskopi (XRF), se figur 25-6. Med denna utrustning kommer metodiken för att bestämma montmorillonithalt och mängden av de accessoriska mineralerna att utvecklas. Andra mätmetoder behöver implementeras och utvecklas för bestämning av amorfa faser samt totalmängden järn(II) respektive järn(III) i bentoniten. Metoder för att på ett representativt sätt hantera och provta en större mängd lera behöver tas fram. Utrustning för att krossa och mala stora mängder bentonitlera på ett reproducerbart sätt installerades på Äspölaboratoriet under våren 2013.



Figur 25-5. Kopparkutsar installerades i olika bentonitblock i de nyinstallerade ABM-paketerna 2012 för att öka kunskapen om eventuella interaktioner mellan bentonit och koppar.



Figur 25-6. Ett röntgenlaboratorium har installerats på Äspö för att analysera bentonitlera. I bakgrunden ses en röntgendifraktometer (XRD) för fasidentifiering. I förgrunden ses en röntgenfluorescensspektrometer (XRF) för bestämning av elementarsammansättningen.

Resultaten från ABM och även andra försök indikerar att det finns skillnader i långtidsstabilitet mellan olika bentoniter, se vidare 25.5.14 Montmorillonitomvandling.

För närvarande planerar SKB inga ytterligare experiment med olika bentonitmaterial i Äspö-laboratoriet.

25.4.5 Montmorillonitsammansättning

Mineralet montmorillonit karakteriseras av nanometertunna mineralflak med den ideala strukturformeln:



M representerar positivt laddade motjoner och z är medelvalensen hos motjonerna. Summan av x och y kan per definition variera mellan 0,4 och 1,2 enheter (laddning per $O_{20}(OH)_4$), och $x > y$. En viss andel aluminium (Al) kan betraktas som utbytt mot magnesium (Mg), och en mindre del kisel (Si) är utbytt mot aluminium. Utbytet av trevärt aluminium mot tvåvärt magnesium leder till en negativ nettoladdning i mineralflaken som balanseras av motjonerna (M). I naturliga system förekommer dessutom andra substitutioner, till exempel kan järn ersätta aluminium i viss omfattning. En varierande mängd vattenmolekyler (n) kan inkorporeras mellan mineralflaken.

Beroende på vilka de positiva motjonerna är hydratiserar de i varierande grad. En natriumdominerad montmorillonit anses ha ett vattenlager mellan skikten vid en relativ fuktighet på cirka 50 procent, medan en kalciumdominerad montmorillonit vid samma fuktighet har två vattenlager kring de hydratiserade jonerna (Brindley och Brown 1980).

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Det finns inga direkta synpunkter från granskningen av Fud-program 2010.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Studier med röntgenabsorptionspektroskopi (Fe-, K-XANES) har utförts på Max-lab-synkrotronen på renframställda montmorilloniter och deras ursprungslerar utvalda från ABM-experimentet. Målet var att studera förhållandet mellan järn(II) och järn(III) i lerorna för att på ett korrekt sätt kunna bestämma montmorilloniternas strukturformler. De undersökta montmorilloniterna dominerades alla av järn(III), liksom större delen av råbentoniterna, vilka dock ofta innehöll en mindre mängd järn(II). Ursprunget till järn(II) i råleran är sannolikt pyrit eller siderit. Resultaten publiceras i en doktorsavhandling under 2013.

Program

Montmorillonitens flakladdning är kärnan i dess svällande och tätande egenskaper. För att bättre förstå skillnader mellan olika montmorilloniter med olika ursprung behöver vidare studier genomföras för att öka kunskapen om bestämningen av flakladdningen. Flakladdningen kan antingen bestämmas experimentellt med olika metoder (till exempel svällning med alkylammoniumjoner i XRD) eller beräknas utifrån en korrekt strukturformel. Bestämningen av en strukturformel är känslig eftersom det ibland är mycket svårt att renframställa montmorillonit samt att vissa element till exempel aluminium kan sitta på olika ställen i kristallstrukturen och järn kan ha olika oxidationstal, vilket påverkar den resulterande laddningen. Ökad kunskap om järnets redoxkemi i montmorillonit samt djupare studier av kisel och aluminium, med exempelvis fast-fas-NMR eller röntgenabsorptionspektroskopi skulle ge mer information och minska osäkerheterna vid bestämningen av mineralets strukturformel. Större kunskap om de olika kisel-faserna som följer lerfraktionen skulle sannolikt också vara värdefull.

Planerad verksamhet är utvärdering av olika preparativa metoder för att undersöka om de på ett bättre sätt kan användas för att renframställa montmorillonit i olika typer av bentonit. Användandet av kompletterande analytiska mätningar kan alternativt komma till användning för att justera för bimineralens inverkan. Verksamheten kommer framför allt att ske internt på röntgenlaboratoriet på Äspö, se avsnitt 25.4.4 Bentonitsammansättning. Eventuella skillnader i långtidsstabilitet hos leror med olika montmorillonitsammansättning kommer vidare att studeras i försöket med alternativa buffertmaterial, ABM, vid Äspölaboratoriet, se avsnitt 25.4.4 Bentonitsammansättning.

25.4.6 Porvattensammansättning

När bentoniten levereras kommer vattenkvoten enligt dagens specifikation att vara maximalt 12 procent. Före pressning till block tillsätts avjoniserat vatten för att nå en vattenkvot på 17 procent. Buffertmaterialet kommer att analyseras med avseende på ingående mineral samt på joner i supernatanten hos dispergerat material (vattenlösningen ovanför uppslammat och centrifugerat prov). Denna kvantifiering ger en möjlighet att beräkna porvattnets initialsammansättning.

Den initiala porvattensammansättningen har ingen direkt betydelse för buffert- eller återfyllningsmaterialets långsiktiga funktion.

25.4.7 Hydrovariabler

Hydrovariablerna är vattenflöde, vattentryck, gasflöde och gastryck. Initialt är det relevant att beskriva vatten- och gastryck. Flöden förekommer inte initialt i bufferten. Vid inplacering av kapsel och buffert kommer deponeringshålen att hållas dränerade och förvaret kommer att vara öppet till atmosfärstryck. Detta ger ett gastryck (luft) av en atmosfär (cirka 0,1 megapascal) och ett vattentryck av 0–0,1 megapascal i omgivningen. Däremot kommer det att finnas ett initialt porvattenundertryck i de omättade bentonitblocken som driver intransporten av vatten. Detta undertryck är av storleksordningen 40 megapascal.

25.4.8 Spänningstillstånd

Svälltrycket börjar bildas när buffert och återfyllning kommer i kontakt med externt vatten, se avsnitt 25.5.5 Vattentransport vid omättade förhållanden och 25.5.9 Svällning. Initialt finns inget svälltryck. De initiala trycken kommer från tyngden av ovanliggande bentonitblock och (för undre blocket) kapseln.

25.4.9 Porgeometri

För att uppnå de definierade buffertfunktionerna krävs en specifik motjonskoncentration i porvattnet. För ett givet buffertmaterial styrs koncentrationen av den totala vattenvolymen, som bestäms av porositeten. Buffertens tätande egenskaper, som svälltryck och hydraulisk konduktivitet, är starkt beroende av densitet/porositet.

I SKB (2009a) ges att designförutsättningarna för bufferten i mättat tillstånd har en densitet på $2\,000 \pm 50$ kilo per kubikmeter (kg/m^3). Detta baseras på egenskaperna hos referensmaterialet (MX-80) som har en korndensitet på $2\,750 \text{ kg/m}^3$ och förutsätter att vattendensiteten är $1\,000 \text{ kg/m}^3$. Buffertens torrdensitet är därmed $1\,570 \pm 30 \text{ kg/m}^3$ vilket motsvarar en porositet på 43 ± 3 procent.

För ett alternativt buffertmaterial, med en annan korndensitet, behöver densitetens specifikation ändras för att uppnå samma tätande egenskaper. Relationen mellan porositet, densitet och korndensitet beskrivs av enkla geotekniska samband. Korndensiteten för ett stort antal alternativa buffertmaterial är bestämda (Karnland et al. 2006).

För väggbufferten i silon i SFR finns krav både på låg hydraulisk konduktivitet för att förhindra vattenströmning och ett måttligt svälltryck för att inte skada betongkonstruktionen. Detta ställer krav både på en högsta och lägsta densitet i materialet. Väggbufferten har en torrdensitet som ligger på runt $1\,000 \text{ kg/m}^3$ för de lägsta 15 meterna, 990 kg/m^3 för intervallet 15–30 meter och 980 kg/m^3 för 30–50 meters höjd. Detta motsvarar mättade densiteter på 1 650, 1 625 respektive 1 600 kg/m^3 (Pusch 2003).

Bottenbädden i silon består av en 10/90-blandning av bentonit och ballast. Den installerades med en torrdensitet på $2\,170 \text{ kg/m}^3$ ($2\,370 \text{ kg/m}^3$ efter mätnad). Toppbädden förutsätts i dag att få samma egenskaper som bottenbädden.

25.4.10 Geometri

Buffertens geometri bestäms av dimensionerna på kapseln och den tjocklek på buffertmaterialet som krävs för att få önskad funktion. De tidigare angivna måtten med 35 centimeter på kapselns sidor, 50 centimeter under kapseln och 150 centimeter ovanför kapseln gäller fortfarande för KBS-3V (Karnland et al. 2009). Dimensionerna kan bli något annorlunda för KBS-3H.

Bufferten i silon i SFR består av en botten- respektive toppbädd samt en väggfyllning, se figur 25-7.

25.4.11 Strålningsintensitet

Dosraten på kapselytan beräknades i SR-Site till maximalt 500 milligray per timma (mGy/h). Strålningen domineras av radionukliden cesium-137. Dosraten används för att bedöma radiolys av porvatten och strålinducerade förändringar av montmorilloniten.

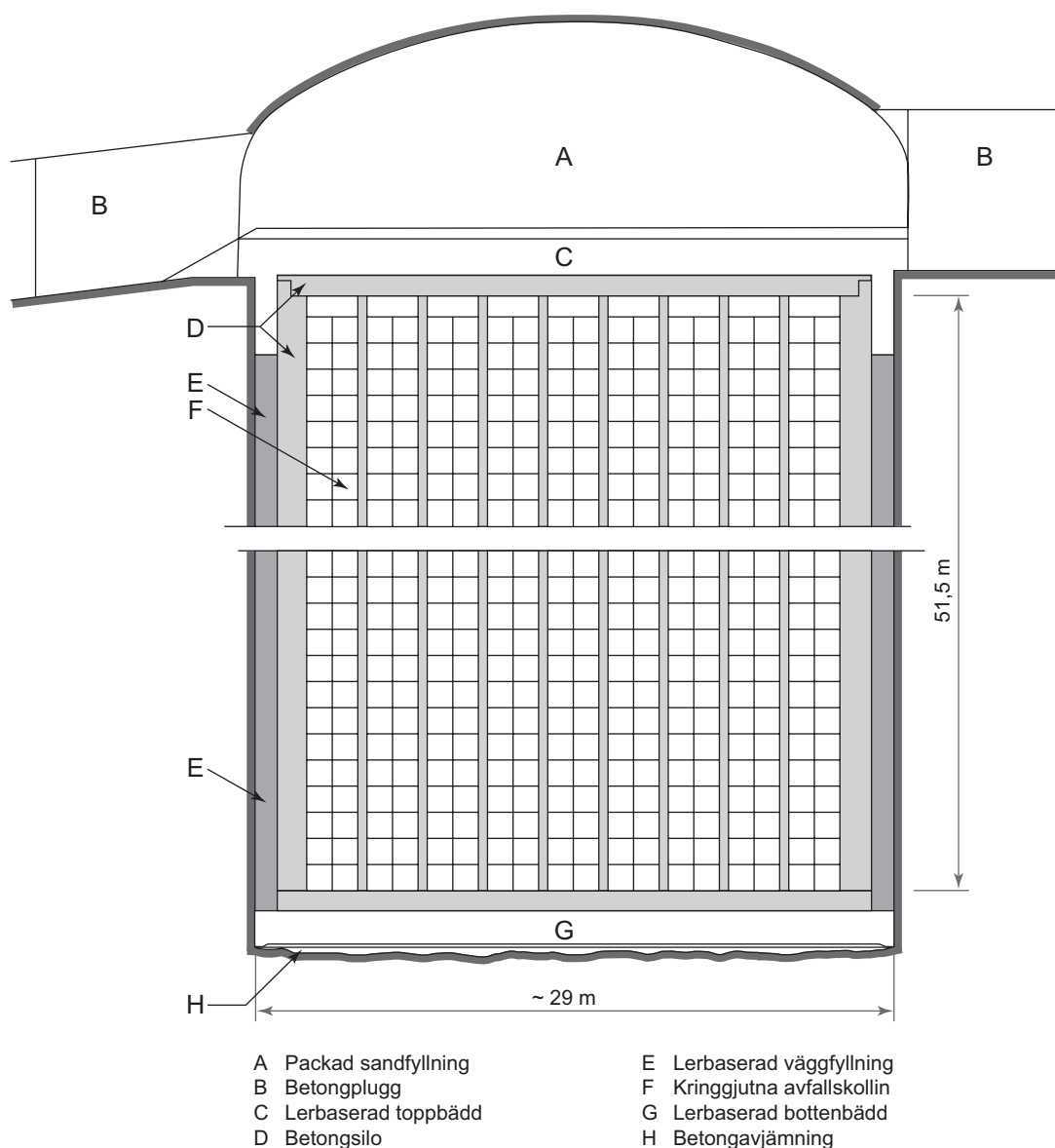
25.4.12 Temperatur

Bufferten och återfyllningen har vid deponering samma temperatur som omgivningen. I Forsmark förväntas temperaturen i berget att vara runt $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Temperaturen beror till viss del på hanteringssekvensen, var buffertblocken har lagrats, värme från deponeringsmaskinen, årstid etc. Det är rimligt med en osäkerhet på omkring $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Bestämningen av den initiala bufferttemperaturen är trivial, i motsats till värmetransporten i bufferten efter deponering, se avsnitt 25.5.3 Värmetransport.

25.4.13 Strukturella och kvarlämnade material

I dagsläget förväntas inte att några konstruktionsmaterial lämnas kvar i deponeringshålen. Däremot planeras det fortfarande för någon typ av avjämning i botten på hålen, se avsnitt 13.6 Installation av buffert och återfyllning. I SR-Site behandlades bottenplattan som en egen systemdel.



Figur 25-7. Principsektion genom silon i SFR (Pusch 1985).

25.5 Processer

En djupgående förståelse och hantering av de processer som äger rum över tid i förvarssystemet är grundläggande för säkerhetsanalysen. De primära informationskällorna för detta är resultaten från årtionden av forsknings- och utvecklingsarbete, som utförts av SKB och andra organisationer. I ett vidare perspektiv bygger dessa resultat i sin tur på kunskap som växt fram under århundraden av vetenskaplig och teknisk utveckling. Forsknings- och utvecklingsarbetet har lett till att en rad processer som äger rum i de tekniska barriärerna och inom de naturliga system, som är av vikt för säkerheten på lång sikt, har kunnat identifieras.

Detta avsnitt beskriver de identifierade processerna i lerbarriärerna.

25.5.1 Översikt av processer

Buffert

Vid inplaceringen kommer bufferten i kontakt med den varmare kapselytan. Genom värmetransport sprids värmeenergin genom bufferten och dess temperatur ökar. Den gamma- och neutronstrålning som tränger ut ur kapseln minskar i intensitet genom stråldämpning i bufferten.

I buffertens porer råder initialt ett kapillärt undertryck, som leder till att vatten transporteras in från det omgivande berget. Efter att bufferten mättats med vatten är transporten mycket långsam. Gastransport kan förekomma vid mätnadsförloppet, då ånga kan flöda från buffertens varmare delar för att kondensera i de yttre kallare partierna. Ursprungligen finns även luft i bufferten. Genom att lösas i porvattnet kan den lämna bufferten. Processen kallas gaslösning. Efter vattenmättnad kan gastransport förekomma om en kapsel skulle skadas med åtföljande vätgasbildning från korrosion av insatsen i kapseln.

Om det finns ett inflöde av vatten i deponeringshålet och detta är större än bentonitens förmåga att ta upp vatten, kan det bildas kanaler i pelletsalten mellan buffertblocken och berget. Fenomenet kallas piping och kan leda till att buffertmassa förloras från deponeringshålet.

Vid vattenupptaget sväller buffert och återfyllning och ett svälltryck utbildas, som blir olika i buffert och återfyllning. Detta medför att dessa växelverkar mekaniskt. Svälltrycket är avgörande för den mekaniska växelverkan mellan kapsel och buffert och kan bland annat innebära att kapseln rör sig i bufferten. Svälltrycket ger också bufferten dess självläkande förmåga. Vid uppvärmningen kan framför allt porvattnet utvidgas genom termisk expansion.

Den kemiska utvecklingen i buffert och återfyllning bestäms av en rad transport- och reaktionsprocesser. Vattenlösta ämnen kan transporteras genom advektion och diffusion. I bufferten förekommer advektion nästan uteslutande under vattenmättnadsförloppet, därefter dominerar diffusion. Genom osmos kan framför allt salthalten i grundvattnet påverka buffertens fysikaliska egenskaper. Jonbyte och sorption ersätter buffertens ursprungliga innehåll av laddningskompenserande motjoner med andra jonslag. Kemisk omvandling av buffertens svällande mineral kan förekomma med ändrade buffertegenskaper som följd. Andra mineral omsätts i bufferten, bland annat genom olika lösnings- och fällningsreaktioner. Vid svällningen tränger bufferten ut i det omgivande bergets sprickor och kan där tänkas bilda kolloider, som kan föras bort av grundvattnet. Detta kan leda till en successiv erosion av bufferten. Leran kan omvandlas genom strålpåverkan och porvattnet kan sönderdelas av radiolys. Slutligen kan mikrobiella processer tänkas förekomma i bufferten.

Efter vattenmättnad förväntas radionuklidtransport i bufferten ske uteslutande genom diffusion i buffertens porer och möjligen också på lerpartiklarnas ytor. Så länge det finns tillräckligt med bentonit kvar i deponeringshålet förväntas varken advektion eller kolloidtransport i en mättad buffert. Radionuklider kan sorberas till lerpartiklarnas ytor. Avgörande för detta är radionuklidens kemiska form, som bestäms av den kemiska miljön i bufferten genom processen speciering. Det radioaktiva sönderfallet bestämmer tillsammans med transportförhållandena i vilken utsträckning radionuklider från en otät kapsel hinner sönderfalla innan de når buffertens yttre gräns.

Återfyllning

Eftersom återfyllningen i likhet med bufferten ska utgöras av högkompakterade block av 100 procent bentonit med en spalt mot berget som fylls med bentonitpelletar, blir alla processer mycket lika de som är i bufferten.

I de följande avsnitten behandlas forskningsprogrammet för de olika processerna i buffert och återfyllning.

Silobuffert

Under fyllningsskedet i SFR hålls bergrummet runt silon dränerat och vattenupptaget i bufferten kommer att vara obetydligt. Bottenbädden komprimeras som en följd av att silon fylls. Vid förslutningen installeras toppbädden. När dräneringen stängs av börjar vattenmättnaden i bufferten.

När bufferten är vattenmättad utbildas fullt svälltryck mot betongkonstruktionen. Detta tryck kan öka när grundvattnet blir mer utspätt. Kalcium från betongen kommer att jonbyta med natrium i bentoniten. Betongporvattnets pH kommer att påverka montmorilloniten i bentoniten, vilket innebär att nya mineral kommer att bildas. Under permafrostförhållanden kan silon frysa.

25.5.2 Stråldämpning/värmealstring

Gamma- och neutronstrålning från kapseln dämpas i bufferten. Dämpningens storlek beror främst av buffertens densitet och vattenhalt. Resultatet blir ett strålfält i bufferten. Strålfältet kan bland annat leda till radiolys av vatten och en marginell påverkan på montmorilloniten. Den strålning som inte dämpas i bufferten, tränger ut i berget. Förståelsen av processen bedöms vara tillräcklig för säkerhetsanalysens behov.

25.5.3 Värmetransport

Värmetransport är en viktig process i bufferten som påverkar temperaturutvecklingen i närfältet. Processen är av mindre betydelse i återfyllningen och i silobufferten.

Den termiska utvecklingen av närområdet har betydelse som allmänna indata för de mekaniska, kemiska och hydrologiska processerna. Det temperaturkriterium som är direkt relevant för säkerheten rör den maximala bufferttemperaturen. Enligt kriteriet får denna temperatur inte överstiga 100 °C. Temperaturen är pessimistiskt vald för att med marginal undvika mineralomvandlingar i bufferten.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SSM ansåg att det inte är uppenbart att en kvasistationär värmetransport kan förutsättas i beräkningarna av värmeöverföringen med tanke på att värmekällan i kapseln är tidsberoende. SKB bör undersöka om antagandet om stationär värmetransport i bufferten är rimligt och om värmelagringen i bufferten är försumbar.

SSM ansåg vidare att SKB bör undersöka hur en lokal uttorkning av bufferten närmast kapseln påverkar temperaturutvecklingen.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Analysen i SR-Site av den termiska utvecklingen bygger på de riktlinjer för dimensionering och de beräkningsscheman som fastställdes av Hökmark et al. (2009) samt på resultaten i projekteringsrapporten (SKB 2009b) med avseende på layout D2 för Forsmark då dessa riktlinjer tillämpades. Detta beskrivs i produktionsrapporten för berglinjen (SKB 2010i) samt i SR-Site.

De numeriska beräkningarna i projekteringsrapporten är adekvata och tillräckliga för att visa att säkerhetsanalysens krav på 100 °C uppfylls för samtliga kapslar. Dessa beräkningar avser emellertid endast de första 20 åren efter deponeringen och gäller endast för kapslar som deponerats i bergvolymer som i huvudsak består av berg med låg värmeledningsförmåga. De kan inte användas för att uppskatta hur många kapslar som faktiskt kommer att nå maximala temperaturer, som närmar sig den gräns som specificerades vid projekteringen. Det bör noteras att majoriteten av kapslarna kommer att deponeras i berg som har egenskaper som är ungefär desamma som domänens medelvärden och följaktligen uppnår lägre maximala temperaturer.

I SR-Site skulle i genomsnitt mindre än en deponeringsposition av totalt 6 000, ha en maximal bufferttemperatur som överstiger 95 °C, vilket betyder att utformningskravet skulle vara uppfyllt med en marginal på 5 °C i denna analys. En mycket stor majoritet av kapslarna, omkring 98 procent, kommer att ha en marginal på 10 °C eller mer. Dessutom är de maximala temperaturerna över-skattade på grund av följande:

- Samtliga kapslar antas vara deponerade med det nominella kapselavståndet över hela förvaret. I själva verket kommer vissa deponeringshål att uteslutas. Kapslar som gränsar till uteslutna positioner kommer att ha lägre temperaturer.
- Samtliga kapslar antas vara deponerade i de centrala delarna av deponeringsområdena. I verkligheten kommer omkring 1 000 kapslar att vara deponerade tillräckligt nära tunnarnas ändar för att de maximala temperaturerna där ska vara lägre.
- Samtliga deponeringshål antas vara fullständigt torra, med en 10 millimeter luftfylld spalt mellan kapseln och bentoniten. I verkligheten kommer mätnadsgraden att variera. En del av hålen kommer att vara tillräckligt nära mätnad för att modellen för våta hål snarare än den för torra hål kan tillämpas. Detta kommer att sänka de maximala temperaturerna.

Program

Värmetransport hanteras generellt i kapitel 26.3 Värmetransport.

25.5.4 Frysning

När vatten genomgår fasförändring till is ökar volymen (cirka 9 procent). Om vatten i bentonitbufferten fryser förväntas därför trycket att öka vilket skulle kunna skada kapsel och berg.

Frysunkten hos bentonit beror på vatteninnehållet (densitet), men är generellt sett lägre än den hos rent vatten, som vid atmosfärstryck fryser vid 0 °C. Fryspunktsänkningen i bentonit är helt analog med den i vanliga saltlösningar. För buffertdensitet ligger den kritiska temperaturen (T_c) i intervallet mellan -4 °C och -10 °C. Allt vatten fryser inte vid en och samma temperatur och även vid så låga temperaturer som -50 °C har montmorilloniten kvar två vattenlager, det vill säga bara det tredje lagret samt eventuellt vatten som finns utöver det bildar is vid frysning (Svensson och Hansen 2010).

Bufferten påverkas emellertid även av att omgivande grundvatten fryser genom att svälltrycket sjunker. Trycksänkningen är approximativt linjär med temperaturen och svälltrycket är noll vid bentonitens fryspunkt. Även denna effekt är helt analog med hur det osmotiska trycket sjunker i en saltlösning med sjunkande temperatur under 0 °C.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SSM ansåg att SKB bör motivera sitt antagande om en-typ-porvatten i teorin. Dessutom bör SKB undersöka om andra viktiga mekanismer såsom elektrostatisk växelverkan bör inkluderas i teorin.

SSM ansåg vidare att SKB bör utreda om islinser, som i studier om SFR har visats kunna uppstå (Emborg et al. 2007), även kan bildas hos en frusen eroderad buffert. SKB bör mer ingående utreda och redovisa konsekvenser till följd av frysning av återfyllningen.

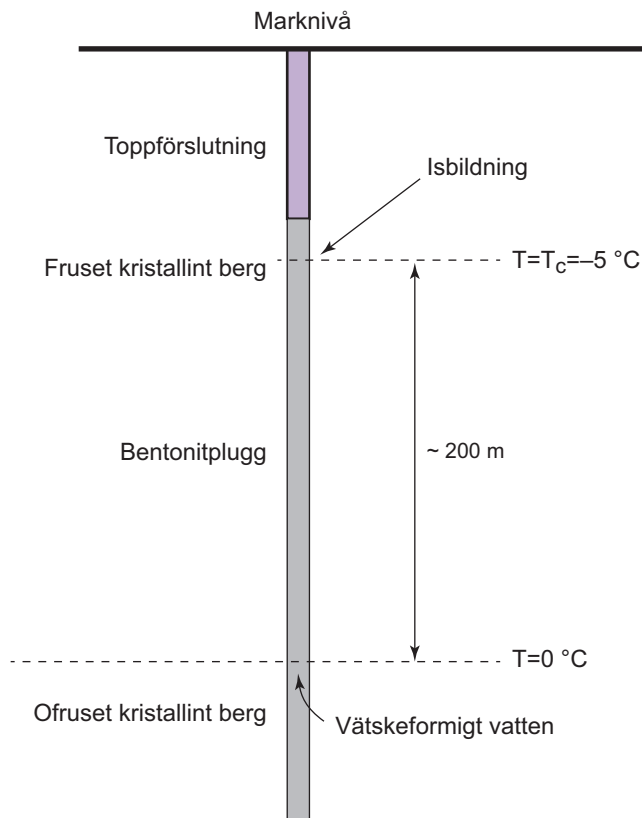
Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

Inom SR-Site utvärderades sannolikheten för att buffertleran kommer att frysa på försvarsdjup. Med den mest pessimistiska kombinationen av alla osäkerheter når osäkerhetsintervallet för -4 °C-isotermer ett maximalt djup av 316 meter. Detta visar att temperaturer som skulle kunna orsaka frysning av bufferten inte når försvarsdjup i referensutvecklingen ens i det mest pessimistiska fallet.

Referensdensiteten hos borrhålsförslutningarna är densamma som hos bufferten. Men förslutningarna kommer högst sannolikt att utsättas för temperaturer lägre än den kritiska temperaturen på grund av deras vertikala utsträckning upp till cirka 100 meter under ytan, se figur 25-8. På grund av den vertikala utsträckningen, råder det dessutom en termisk gradient i borrhålsförslutningen. I Forsmark är den uppmätta geotermiska gradienten i de översta 1 000 meterna lägre än 0,020 °C per meter (Sundberg et al. 2009). Under perioder med permafrost skulle borrhålsförslutningarna kunna utgöra en förbindelse mellan delar av det kristallina berget, i vilket temperaturen är över 0 °C, och delar där isbildning äger rum. Denna utformning skulle alltså kunna ge upphov till tjällyftning då vatten transporteras från lägen där det är flytande till lägen där en islins byggs upp, vilket visas schematiskt i figur 25-8.

Vattentransporten i bentoniten drivs av en suggradient och i denna studie har det konstaterats att i temperaturintervallet 0 °C till den kritiska temperaturen är denna gradient i storleksordningen 1,2 megapascal per grad (MPa/°C) för ett system med homogen densitet. Då den geotermiska temperaturgradienten används konstateras direkt att suggradienten är 0,03 megapascal per meter, eller tre meter vattenpelare per meter. Den senare kan användas direkt i uttrycket för Darcyflöde och då en hydraulisk konduktivitet på $K_h=10^{-13}$ meter per sekund antas (Karnland et al. 2006) erhålls ett flöde av $3 \cdot 10^{-13}$ meter per sekund.

Detta flöde ger en övre gräns för hastigheten för den möjliga islinstillväxten. Det bör noteras att om en konstant geotermisk gradient antas, är denna gräns oberoende av den sträcka som vattnet måste transporteras. Eftersom det aktuella problemet i princip är endimensionellt, kan detta analyserade flöde direkt omvandlas till en tillväxtökning av islinsen på ungefär 10 mikrometer per år.



Figur 25-8. Översiktsbild över den möjliga islinnsbildningen i borrhålsförlutningen i KBS-3-förvaret. En geotermisk gradient av $0,025\text{ °C}$ per meter och en kritisk temperatur i bentoniten av -5 °C antas här. (Birgersson et al. 2010).

Från denna uppskattning inses att islinnsbildning inte kommer att utgöra något problem, då den som mest kommer att ge en uppbyggnad på 10 centimeter under en period av 10 000 år. Eftersom denna vattentransportprocess är seriell till sin natur, kan det noteras att det är det lägsta värdet på den hydrauliska konduktiviteten över den berörda längden som kommer att bestämma q , det vill säga sektionen med lägst K_h kommer att vara hastighetsbestämmande. Denna prognos är således relativt robust. Processen är dessutom endast aktiv när temperaturen i de översta delarna av förlutningen är under den kritiska temperaturen, vilket endast kommer att inträffa under delar av en period med permafrost.

I silon i SFR är dock situationen mindre gynnsam. Den hydrauliska konduktiviteten i silobufferten är betydligt högre (i storleksordningen 10^{-10} meter per sekund), vilket innebär att en islin skulle kunna växa med 10 millimeter per år.

En förutsättning för att islinser ska kunna bildas är att en del av leran är i kontakt med ofruset grundvatten, medan linsen bildas i en annan del. På förvarsdjup kommer vattnet i det omgivande berget att frysa innan vattnet i bufferten/återfyllningen fryser och därför kan islinser inte växa till.

Program

Frysning av lerbarriärer på Kärnbränsleförvarets djup i Forsmark bedöms inte kunna ske. Inga ytterligare insatser inom det området kommer att genomföras under perioden. Frysningen av silobufferten kommer att utvärderas i SR-PSU.

25.5.5 Vattentransport vid omättade förhållanden

När buffertblocken och pelletfyllningen installerats i ett deponeringshål kommer bufferten att ta upp vatten från det omgivande berget. Under mättnadsfasen kommer bufferten att utbilda ett svälltryck

som påverkar berget, kapseln och återfyllningen mekaniskt. Vattentransporten i den omättade bufferten är en komplicerad process, som bland annat är beroende av temperatur, densitet, smekthalt och vattenkvot i buffertens olika delar. Den viktigaste drivkraften för att nå vattenmättnad är den relativa fuktigheten i bufferten, som kan ses som ett kapillärt undertryck i buffertens porer vilket leder till att vatten tas upp från berget. De hydrauliska förhållandena i berget närmast deponeringshålet avgör mättnadsförloppet utveckling. Om tillgången till vatten är obegränsad nås full vattenmättnad mellan kapseln och berget inom ett fåtal år. En rad förhållanden i berget har betydelse för vattentillgången.

Samma modell kan användas för buffert och återfyllning och samma parametrar behövs som indata till modelleringen, men värdena avviker eftersom materialen är olika.

Säkerhetsfunktionerna för bufferten och återfyllningen förutsätter att ett fullständigt vattenmättat tillstånd råder. Detta borde betyda att bufferten och återfyllningen måste vara mättade för att fungera korrekt. Emellertid är det inte nödvändigt med en fungerande buffert så länge deponeringshålet är omättat, eftersom ingen massöverföring mellan kapseln och grundvattnet i berget kan ske i det omättade stadiet. Vattenmättnadsprocessen har därför i sig själv ingen direkt inverkan på buffertens och återfyllningens säkerhetsfunktioner. Det är ändå viktigt att förstå vattenmättnadsprocessen, eftersom den definierar barriärernas tillstånd under förvarets tidiga utvecklingsskede. Slutligen kan ventilation av deponeringstunnlar under långa tidsperioder (före återfyllning av deponeringshålen och tunnarna) medföra att det omgivande berget torkas ut. Denna luftfyllda porvolym i berget kan potentiellt utgöra en sänka för vattnet som finns i bufferten under installationen. Om en betydande mängd av detta vatten skulle transporteras in i berget, skulle det eventuellt kunna leda till en betydande ökning av kapselytans högsta temperaturer.

I SFR kommer driftfasens dränagepumpning att upphöra då förvaret försluts. Då kommer återmättnaden av silobufferten att starta. Vattentransporten i den omättade silobufferten sker principiellt på samma sätt som i bufferten i Kärnbränsleförvaret, men med andra materialdata och randvillkor.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SSM ansåg att SKB:s modell för beskrivning av vatteninflödet till bufferten eller återfyllnaden är otillräcklig för att beskriva det uppenbart heterogena vatteninflödet i bentonit, som uppvisas i många laboratorieförsök samt fältförsök.

SSM ansåg vidare att SKB bör motivera sitt antagande om en isotermisk utveckling i återfyllningen bättre. Beträffande ångtransport i omättad buffert menade SSM att SKB även bör beakta en möjlig konvektionsmekanism utöver molekylärdiffusion.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

I SR-Site gjordes en omfattande analys av tiden för återmättnad av återfyllning och buffert. Eftersom berget i Forsmark förväntas innehålla mycket få vattenförande sprickor, där avståndet mellan desamma normalt är över 100 meter, kan mättnaden av återfyllningen uppnås vid allt mellan < 100 år och omkring 6 000 år. De längre tiderna gäller för deponeringspositioner som ligger långt från de vattenförande sprickorna. Liksom för mättnaden av återfyllningen är tiden för mättnad av bufferten i hög grad beroende av de lokala hydrauliska förhållandena. En vattenförande spricka i, eller i närheten av, deponeringshålet kommer att göra att mättnad uppnås ganska snabbt. Ett deponeringshål där vattnet enbart tillförs från berget, kommer däremot att förbli omättat under hundratals år. Med tanke på den förväntade låga förekomsten av vattenförande sprickor i Forsmark, kan mättnaden av bufferten uppnås från allt mellan < 10 år och omkring tusen år. De längre tiderna gäller för deponeringshål som inte står i förbindelse med vattenförande sprickor. Dessutom påverkas buffertens värmeledningsförmåga av omfördelningen av den fukt som finns i bufferten i deponeringshål med en torr omgivande bergmassa. Detta beaktas i analysen av buffertens termiska utveckling.

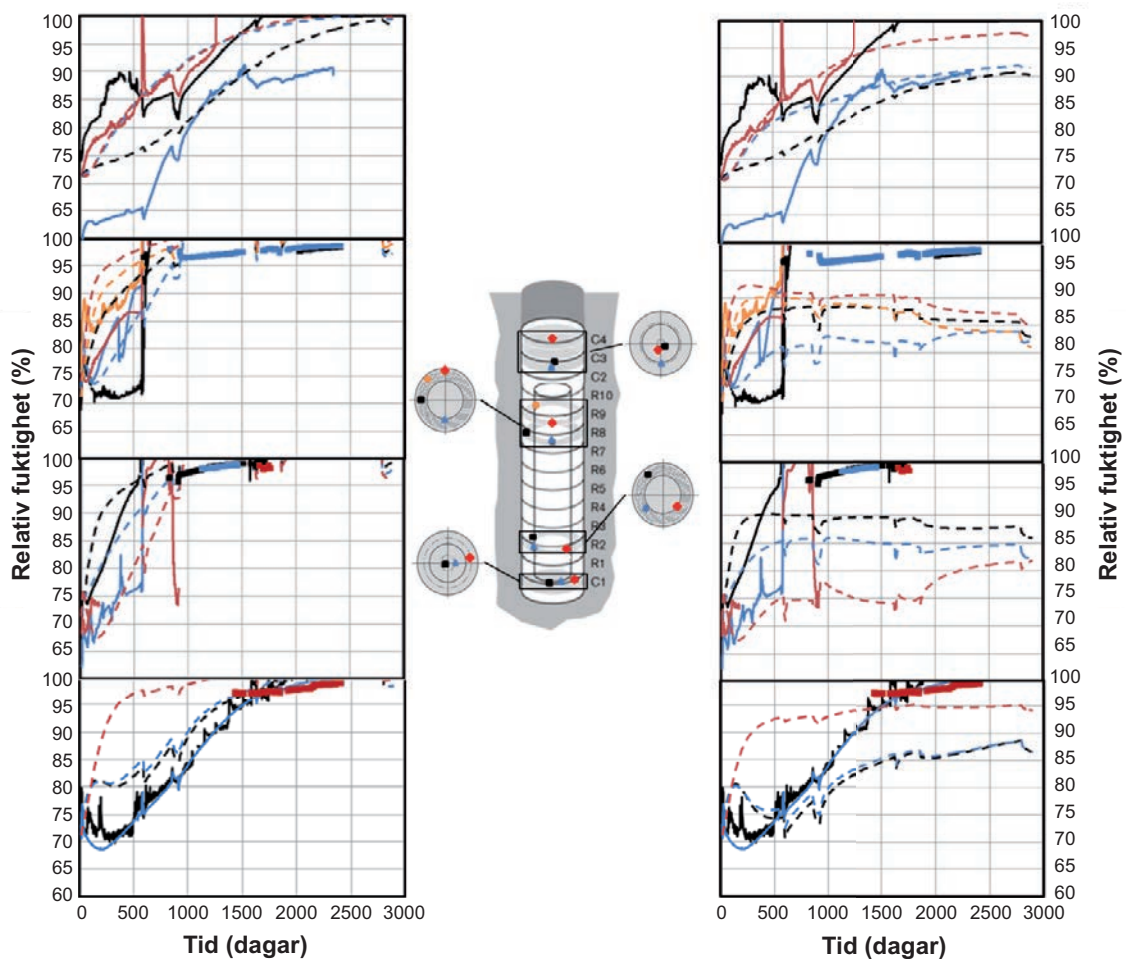
Ett omfattande arbete med THM-modellering av TBT-försöket (Temperature Buffer Test) har genomförts och avrapporterats (Åkesson et al. 2012a). Tre grupper har modellerat olika aspekter av försöket med två olika numeriska modeller: Code_Bright och Abaqus. Utvärderingen visade att materialmodellerna väl kunde beskriva en del av de experimentella resultaten: den termiska utvecklingen, vattenuptaget runt den övre, kallare värmaren, svälltycket (i betydelsen relation mellan portal och effektivspänningen vid brytningen) och kraften i inspänningarna. Det fanns dock aspekter

som modellerna inte klarade på ett tillfredsställande sätt: Uttorkningen runt den undre värmaren överdrevs generellt, den relativa fuktigheten och portrycken runt den undre värmaren var svåra att åter skapa, de beräknade von Mises-spänningarna var i några fall avsevärt lägre än uppmätta data.

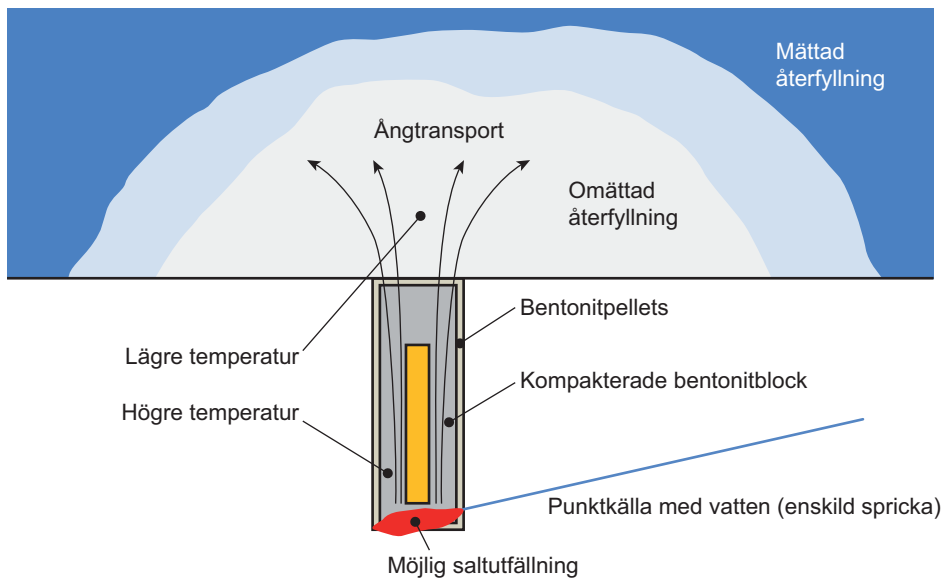
Modellering av Prototypförvaret görs som en del av Äspö Task Force of Engineered Buffer Systems (TF EBS). Huvudsyftet med arbetet i TF EBS har varit att beskriva THM-processerna under driften av Prototypförvaret och att prediktera tillståndet vid brytningen. I det här skedet har arbetet fokuserats på bufferten i det sjätte deponeringshålet. Ett exempel på resultat finns i figur 25-9.

Frågor har uppstått om huruvida vatten från bergsprickor kan förångas mot kapseln och transporteras ut i återfyllningen och genom denna process orsaka saltanrikning mot kapseln (bastueffekt, se figur 25-10). Den allmänna uppfattningen är att detta inte kan inträffa i någon omfattning som är skadlig för kapseln eller bentoniten, men ett försöksprogram för att verifiera detta har påbörjats.

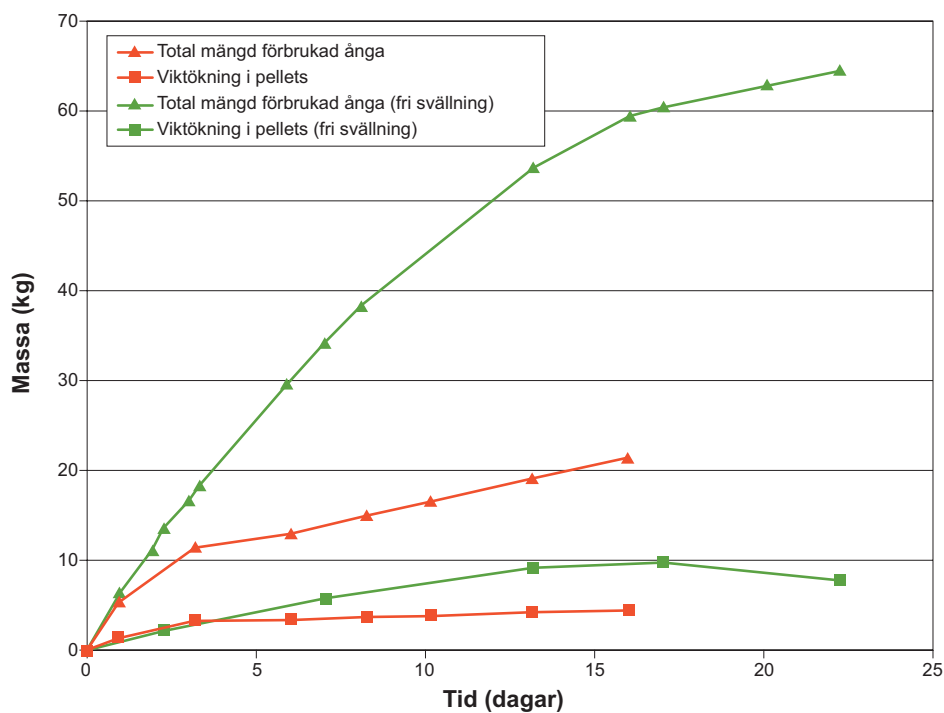
En serie semi-kvantitativa tester har genomförts för att studera en aspekt av bastueffekten: vattenupptag av ånga och förslutningsförmåga hos bentonitpelletar i temperatur- och relativ fuktighetsgradienter. De hittills erhållna resultaten visar att vattenkondensation är en viktig mekanism för vattenupptagsprocessen – vattenångan kondenserar till flytande vatten någonstans i systemet och upptaget till pelletarna sker och sprider sig från denna punkt. Vidare har betydelsen av volymbegränsning på pelletfyllningen för tätningsförmågan påvisats, se figur 25-11. Diagrammet visar totala mängden genomflödad ånga samt mängden vatten upptagen i pelletfyllningen som funktion av tid i två försök, identiska förutom att det ena är fritt att svälla i axiell led (unconfined) medan det andra är inspänt (vilket mer motsvarar förhållanden i Kärnbränsleförvaret), se figur 25-12.



Figur 25-9. Utvecklingen av den relativa fuktigheten vid fyra olika djup och flera olika radier i deponeringshål 6 från de två installationsmodellerna. De streckade linjerna representerar modelldata, heldragna linjer representerar experimentella data från RH-sensorer, medan symbolerna representerar data från suction-sensorer i området (Malmberg och Kristensson 2013).



Figur 25-10. Schematisk figur av den så kallade bastueffekten där salt anrikas runt kapseln när ånga transporteras ut ur deponeringshålet (Birgersson och Goudarzi 2013).



Figur 25-11. Totala mängden genomflödad ånga samt mängden vatten upptagen i pelletfyllningen som funktion av tid i två försök, identiska förutom att det ena är fritt att svälla i axiell led (unconfined) medan det andra är inspänt (vilket mer motsvarar KBS-3-förhållanden) (Birgersson och Goudarzi 2013).

Skillnaderna är som synes stora: medan det inspända systemet når ”steady-state” efter bara några dagar, pågår vattenackumulering (samt större vattenförluster) i det icke inspända fallet i 15–20 dagar. Vidare ses att vattenkonsumtionen är mycket mindre i det inspända fallet (cirka 20 kg mot 60 kg efter 15 dagar) – ett tecken på att det inspända systemet har börjat tätas och är betydligt mindre genomsläppligt för ånga. Det bör noteras att även det icke inspända systemet efter en längre tid visar tecken på tätning – vattenkonsumtionen avtar efter cirka 15 dagar.

Interaktionen mellan grundvattnet i berget och bufferten studeras inom Äspö Task Force. Detta beskrivs utförligare i avsnitt 26.4.5 Task Force för grundvattenflödes- och transportmodellering.



Figur 25-12. Bilden föreställer avslutat försök av det icke inspända systemet (det vill säga där bentoniten har fått svälla fritt), före exkavering (Birgersson och Goudarzi 2013).

Program

Arbetet med att verifiera och uppdatera modellerna för buffertens vattenmättnad fortsätter. Huvuddelen av detta arbete sker inom ramen för TF EBS.

Resultaten från de utförda försöken kring bastueffekten ger inget entydigt svar på om frågan kan avfärdas eller inte. Skalförsök med en verklig geometri i förhållande till Kärnbränsleförvaret har planerats, men kommer inte att utföras under den närmaste sexårsperioden. Någon gång i mitten på 2020-talet bör det dock finnas ett klart underlag för den här frågan.

Silobuffertens återmättnad i SFR modelleras som en del av SR-PSU. I detta ingår:

- Laboratorieundersökningar av svälltryck och hydraulisk konduktivitet före och efter jonbyte. Materialet kompakteras till en kuts med lämplig densitet och efter montering tillsätts avjoniserat vatten. För att få ett jonbyte som innebär att kalcium(II) blir dominerande katjon byts det avjoniserade vattnet mot en lösning av kalciumklorid. Mätning av svälltryck görs kontinuerligt och bestämning av hydraulisk konduktivitet görs vid initial jämvikt och vid jämvikt efter bytet från avjoniserat vatten till kalciumklorid-lösning.
- Laboratieförsök för indata till modellering av bevättningsfasen. För att modellera bevättningsfasen är vattenhållningskurvan (relationen mellan vattenpotentialen och vattenkvoten) och den hydrauliska konduktiviteten av betydelse. Vattenhållningskurvan bestäms med klimatkammare eller psykrometrar beroende på mätområde. Vattenuptagningsförsök genomförs också för att validera den materialmodell som tas fram.
- Modellering av effekter av jonbyte och mekanisk påverkan av cementnedbrytning. Detta innefattar:
 - 1) Analys av effekter av jonbyte i bentoniten
 - 2) Analys av tidskala för jonbyte i bentoniten
 - 3) Analys av hur cementnedbrytning påverkar silon
- Modellering av bevättningsfasen och vattenflödet genom förvaret. Dessa processer kommer att beskrivas med analytiska och/eller numeriska modeller. Huvudsyftet är att uppskatta tiden för återmättnad av silon och att beskriva återmättnadens karaktär samt att studera vattentransporten i den mätade silon.

25.5.6 Vattentransport vid mättade förhållanden

Grunden för bentonitbuffertens tätande egenskaper är montmorillonitmineralets affinitet för vatten. När porvolymen i bufferten är fylld med vatten leder denna affinitet till en effektiv fördelning av vattnet till ett cirka en nanometer tjockt vattenskikt mellan lerpartiklarna. Fördelningen och den direkta kraftsamverkan mellan vattnet och montmorillonitens motjoner är en effektiv begränsning av vattenrörelser. Vanligtvis anges flödesmotståndet för vatten i form av hydraulisk konduktivitet. Referensbentoniterna i SR-Site har en hydraulisk konduktivitet på cirka 10^{-13} meter per sekund vid avsedd buffertdensitet, vilket är av samma storleksordning som sprickfri granit.

Inga tveksamheter råder om buffertens förmåga att begränsa vattenflödet i deponeringshålen i enlighet med dess säkerhetsfunktion, förutsatt att ingen omfattande omvandling eller förlust av bufferten äger rum. Processen är emellertid kritisk eftersom den är beroende av andra processer, framför allt förlust av buffert genom kolloidbildning, se avsnitt 25.5.19 Kolloidfrigörelse/erosion.

Samma modell kan användas för både buffert och återfyllning och samma parametrar behövs som indata till modelleringen, men värdena avviker eftersom materialen inte är identiska.

Detta resonemang är också giltigt för väggbufferten i silon i SFR. Där är dock densiteten avsevärt lägre och den hydrauliska konduktiviteten blir därför högre.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Inga direkta kommentarer lämnades i granskningen av Fud-program 2010.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

Det har nyligen varit en debatt om hur den hydrauliska konduktiviteten av bentonit påverkas av värme och hur hydraulisk konduktivitet ska mätas. (Pusch et al. 2010) rapporterade att den hydrauliska konduktiviteten i MX-80-bentonit som används i Återtagsförsöket i Äspölaboratoriet ökade med tre storleksordningar efter fem års uppvärmning till 95 °C. I publikationen finns dock ingen beskrivning av hur mätningen av hydraulisk konduktivitet utfördes. Samma prov uppvisade ingen förändring i svälltryck. Författarna tolkade ändå detta som en förändring i lermineralogi.

Mer försiktig och systematisk testning av prover från samma försök som utförs av Dueck et al. (2011) visade inga signifikanta förändringar varken i hydraulisk konduktivitet eller i lermineralogi jämfört med referensproverna. Harrington et al. (2013) studerade också den hydrauliska konduktiviteten hos prover från återtagsförsöket. De bestämde sig för att injicera destillerat vatten med en flödes hastighet på endast 1,6 mikroliter per timme för att minimera eventuella störningar i systemet och undvika risken för rörelse hos dissocierade mineralkomponenter (om sådana fanns).

Om bentonitprovet uppvisade en faktisk konduktivitet av $2,0 \times 10^{-11}$ meter per sekund som rapporterats av Pusch et al. (2010) så skulle detta generera en gradient på endast åtta meter per meter (m/m). Det visade sig dock att tryckgradienten som krävdes för att uppnå detta flöde var på över 3 000 m/m och inte åtta m/m som förutsagts. Detta gav en genomsnittlig hydraulisk konduktivitet av $4,7 \times 10^{-14}$ meter per sekund, ett värde är i närheten av vad som bör förväntas för opåverkat material och också i linje med mätningarna i Dueck et al. (2011). Detta visar tydligt att de hydrauliska egenskaperna hos bentonit inte ändras efter fem års uppvärmning.

Program

Vattentransport vid mättade förhållanden är i princip lika med bedömning av den hydrauliska konduktiviteten hos materialen i fråga. Detta är inget eget forskningsområde, utan ingår som en naturlig del i flera olika projekt.

25.5.7 Gastransport/gaslösning

I fallet när en kopparkapsel är skadad och vatten kan komma i kontakt med insatsen, kommer vätgas att bildas inuti den skadade kapseln. Löst gas transporteras långsamt genom bentonitbufferten. Det är mycket troligt att en gasfas och ett gastryck kommer att byggas upp inuti kapseln, och därför viktigt att kunna visa att detta tryck inte kommer att medföra några negativa konsekvenser för förvarets funktion. Detta innebär att gasen måste kunna ta sig ut utan att skada buffert eller berg.

För att den gas som bildas i avfallskollin och betongkonstruktioner i SFR ska kunna ta sig ut krävs att gasförande passager bildas i barriärerna. Gastransporten och mängden förträngt vatten från siloförvaret och bergssalarna bestäms av de ingående barriärernas utformning och barriärmaterialens egenskaper. I siloförvaret omges avfallet av en porös betong med lågt motstånd mot gastransport. För att öppna upp gaspassager i denna krävs endast ett litet gasövertryck och mängden vatten som pressas ut har i experiment uppmätts till 0,1–2 procent av porvolymen (Björkenstam 1997).

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SSM ansåg att SKB bör eftersträva en bättre förståelse av mekanismen för gastransport. Orsaken till skillnaden mellan resultaten från Lasgitförsöket (Large scale gas injection test, försök i Äspölaboratoriet) och motsvarande laboratorieförsök bör undersökas.

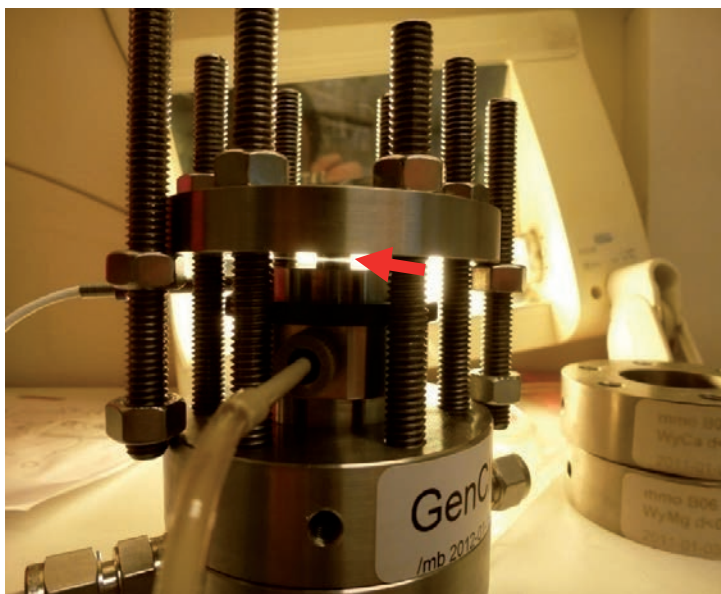
SKB bör utreda gastransport genom en delvis eroderad buffert och bedöma den maximala vätgashalten som kan upprätthållas när bufferten eroderas.

Mer specifikt efterfrågade SSM en uppdatering av modellering av transport i närfältet av Kärnbränsleförvaret av vätgas som utvecklas från korrosion av segjärnsinsats efter kapselbrott.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Ett omfattande experimentellt arbete med gastransport i bentonit har genomförts i EU-projektet Forge, där huvudslutsatserna är:

- Det finns ett linjärt beroende mellan gasflödes hastigheten och tryckgradienten i omättad eller partiellt mättad bentonit – tvåfasflöde är den dominerande transportmekanismen (detta gäller även för mättade blandningar av sand och bentonit om sandhalten är tillräckligt hög).
- Ett högt gastryck kan fördröja mättnaden av bentoniten.
- Klassiska tvåfasflödesmodeller kan inte korrekt representera gastransport i en mättad kompakterad bentonit. Vid en mättnadsgrad på ungefär 80–90 procent eller högre:
 - Inget flöde av gas kommer att ske i bentoniten om inte det pålagda trycket är lika med eller högre än svälltrycket;
 - vid ett tryck under svälltrycket är den enda transportmekanismen den allestädes närvarande diffusionen av löst gas.
- Om gastrycket når ett högre värde än trycket i bentoniten inträffar en mekanisk interaktion, vilket leder till antingen:
 - Konsolidering av bentoniten, och/eller
 - bildning av dilatanta transportvägar.
- Konsolidering: Gasvolymen i leran orsakar en kompression med ökning i lerdensitet närmast gasvolymen och ett ökat lokalt svälltryck att balansera gastrycket. Konsolidering är tydligt observerad i bentonitprover med relativt låg densitet, se figur 25-13. Det finns fortfarande inga tydliga experimentella observationer av konsolidering med vid hög densitet.
- Vid ett kritiskt tryck, kommer dilatanta vägar att bildas och gasen blir rörlig. Transportvägarna är instabila i tid och rum – utflödena är lokala efter gasgenombrottet och ingen mätbar uttorkning har identifierats i några prover.
- Övergången från konsolidering till när dilatanta vägar bildas är oklar. Övergången har observerats vid olika nivåer av gasövertryck:
 - När gastrycket når provtrycket (svälltryck+vattentryck) (till exempel sett i Lasgit).
 - Vid ett övertryck på cirka 20–30 procent.
 - Vid tryck 2–3 gånger högre än provtrycket (svälltryck+vattentryck).
- Om det finns gränssytor mellan bentonit och andra material kommer gasen företrädesvis att röra sig i gränssytan. Detta tycks dock inte påverka transportmekanismen.
- Självläkning av bentoniten sker alltid efter avslutad gastransport.
- I mättade system läker gränssytor mellan bentonitblock och dessa är inte preferentiella transportvägar för gas.



Figur 25-13. Fotografi på bentonit som har blivit konsoliderad av ett gastryck. Gasen har komprimerat bentoniten och ett gasfyllt utrymme har bildats (vid pilen).

Program

Eftersom inga tidiga kapselskador förväntades i SR-Site, är problematiken med gastransport i bentonit inte längre en prioriterad fråga. I SR-Site var de enda mekanismer som skulle kunna skada kapseln erosion och skjuvning och i de fallen är bufferten redan borta (erosion) eller starkt påverkad (skjuvning) och frågan om gastransport är då av något underordnad betydelse.

Ett sista gastransportförsök i Lasgit och ett par laborietester genomförs under 2013 för att förstärka det befintliga underlaget. Lasgit kommer sedan att placeras i viloläge. Det finns dock möjlighet att återuppta försöket om det skulle finnas nödvändigt.

25.5.8 Piping/erosion

Ett hydrauliskt problem under driftskedet rör kanalbildning och tillhörande erosionseffekter i bufferten och återfyllningen. Vatteninflödet till deponeringshålen kommer huvudsakligen att ske genom sprickor och kommer att bidra till bevätningen av bufferten. Om inflödet är koncentrerat till sprickor som är fyllda med mer vatten än den svällande bentoniten kan absorbera, uppkommer emellertid ett vattentryck i sprickan som påverkar bufferten. Eftersom den svällande bentoniten inledningsvis är en gel, med en densitet som ökar med tiden allt eftersom vatten går in djupare i bentoniten, kan gelen vara alltför mjuk för att stoppa vatteninflödet. Resultatet kan bli kanalbildning i bentoniten och ett kontinuerligt vattenflöde samt fortlöpande erosion av bentonitpartiklar. Då uppstår konkurrens mellan bentonitens svällningshastighet och flödes hastigheten genom bufferten samt buffertens erosionshastighet.

Följden av kanalbildning är alltid erosion av material som lösgjorts från kanalerna. Det eroderade materialet transporteras i kanalerna tills det når ett område med mer stillastående vatten i återfyllningen, där det kan sedimentera eller fortsätta ut från återfyllningen in till en öppen transporttunnel. Efter fullständig vattenmättnad och homogenisering av bufferten och återfyllningen samt återetableringen av det hydrostatiska vattentrycket, kommer kanaler och öppningar som orsakats av erosion att läkas och ett svälltryck att etableras. Detta förutsätter att densiteten och det resulterande svälltrycket är höga nog för att övervinna den interna friktionen. Efter det initiala stadiet är risken mycket liten för att kanalbildning ska uppträda igen, eftersom denna kräver en kraftig och snabb ökning av den lokala vattentrycksgradienten i berget vid kontakten med buffert eller återfyllning.

För SFR har processen överhuvudtaget inte diskuterats. Troligtvis har den ytterst ringa betydelse. Vattentrycket runt silon kommer att återställas snabbt när dräneringen stängs av, vilket ger en kort tid under vilken piping kan förekomma.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SSM bedömde att laboratorieförsök bör kompletteras med teoretiska studier för att kunna ge en kvantitativ förståelse av processerna kopplade till piping och erosion.

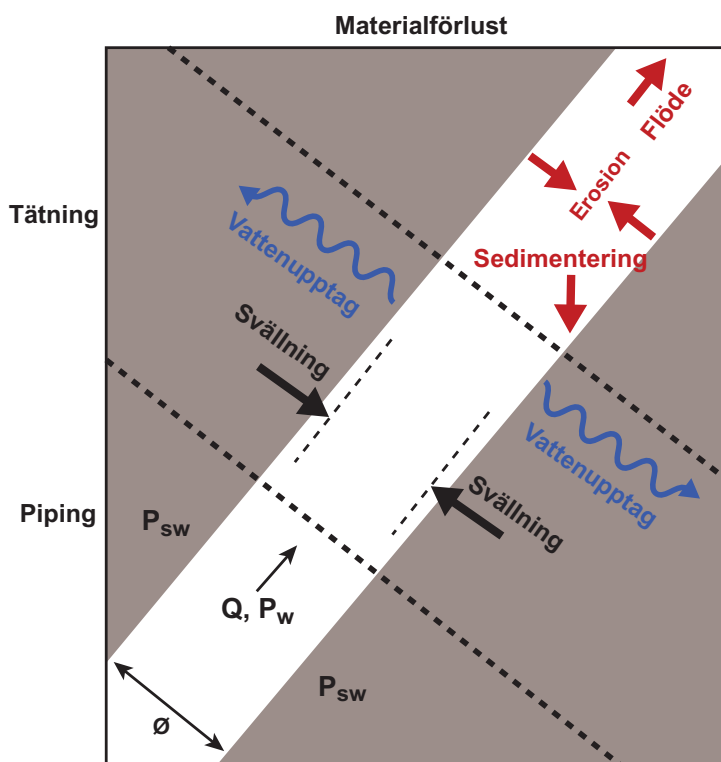
SSM ansåg att SKB bör motivera sitt nya kriterium för högsta tillåtna vatteninflödesvolym för piping/erosion (150 kubikmeter vatten genom ett deponeringshål under buffertens hela bevätnings-tid). SKB bör förklara inverkan av andra faktorer förutom total vattenvolym, såsom flödes hastighet och grundvattentryck.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Ett antal ytterligare tester har utförts för att simulera erosion i ett deponeringshål som framför allt äger rum i vertikal riktning i pelletfyllningen (Sandén och Börjesson 2010). Baserat på dessa tester har en exponentiell erosionsmodell föreslagits (Sandén och Börjesson 2010). Enligt modellen relateras den ackumulerade massan av eroderad bentonit till den ackumulerade massan av eroderande vatten. Denna modell användes i konsekvensanalysen av piping i SR-Site.

En konceptuell modell för piping och erosion, se figur 25-14, håller för närvarande på att utvecklas. Angreppssättet för detta är att göra distinktioner mellan de tre olika processerna: piping, tätning och förlust av material samt att beskriva dessa så koncist som möjligt. Olika varianter av beskrivningar kan komma att undersökas. Det slutgiltiga målet är att härleda matematiska samband för de olika processerna, vilka i sin tur kan kombineras i olika typer av matematiska modeller.

Piping betraktas som en hydraulisk process med vattentransport genom ett rör, vilken upprätthålls så länge portrycket är lika med, eller överstiger svälltrycket i den omkringliggande bentoniten. Flödes hastigheten antas vara relaterad till den hydrauliska gradienten och rörets radie i enlighet med Hagen–Poiseuilles ekvation.



Figur 25-14. Konceptuell modell för piping och erosion. Grått representerar bentonit och vitt den bildade kanalen.

Tättningsprocessen betraktas som en hydro-mekanisk process, som inkluderar vattenupptag i omkringliggande bentonit, vilket i sin tur leder till svällning. Första steget för att beskriva denna process är att definiera en densitetsprofil för bentoniten runt röret. Formen hos profilen ska bland annat kunna ge en relation mellan rörets radie, massan av förlorat material samt avståndet till en mättnadsfront. Idén med ett sådant angreppssätt är att det skulle kunna göra det möjligt att efterlikna ett rör som sluts och att pipingen upphör.

Förlust av material betraktas som en komplex process som inkluderar erosion av bentonit ut i en vattenfas, sedimentation samt advektiv transport av bentonit. Erosionen antas generellt styras av skjuvhållfastheten för bentoniten och skjuvkrafterna från flödande vatten. Sedimentationen antas också ha en betydande inverkan på koncentrationen i eroderande vatten, eftersom observerade koncentrationer i vertikala erosionstester är betydligt lägre än motsvarande halter i horisontella erosionstester. Första steget för att beskriva denna process är att formulera och analysera en massbalans med antagna uttryck för erosionen respektive sedimentationen.

Program

Erosionsförsöken inom Eva-projektet fokuserar på vad som händer med pelletar i deponeringshålen när det finns ett vattenflöde. Bland annat studeras:

- Erosionen som funktion av tid och ackumulerat flöde.
- Effekter av flödeshastighet och salthalt.
- Effekter av geometri (längd, cylinder/gap, öppet eller slutet system).
- Sammansättningen av den eroderade bentoniten.

25.5.9 Svällning

Buffertens primära funktion är att säkerställa att transporten av olika ämnen, från berget till kapseln och från kapseln till berget, domineras av diffusion. Svälltrycket i bentoniten förväntas täta alla spalter och säkerställa att berget och bufferten står i god kontakt med varandra. Det är därför viktigt att svälltrycket upprätthålls. Ett svälltryck på en megapascal utgör kriteriet för säkerhetsfunktionsindikatorn för att upprätthålla den självläkande förmågan hos bufferten. Å andra sidan får inte svälltrycket överskrida 15 megapascal för att trycket på kapsel och berg ska begränsas.

Svällningsprocessen har slagits samman med andra spännings- och töjningsrelaterade processer som kan förorsaka massomfördelning i bufferten, till exempel termisk expansion, kryprörelser och ett antal interaktioner med kapsel, närområdesberg och återfyllning. Framst avses processer efter full vattenmättnad, men många modelleringar har förenklats och gjorts under antagande att slutresultatet är ganska oberoende av om svällningen och homogeniseringen sker före eller efter full vattenmättnad. De modellerna har emellertid förbättrats under senare år och en del nya homogeniseringsberäkningar har gjorts och ska göras utan denna förenkling, det vill säga under omättade förhållanden.

I bufferten och återfyllningen, som är inhomogena vid inplaceringen, kommer vattenupptaget efter deponeringen att leda till svällning. Den medför att alla spalter i bufferten, mellan berg och buffert och mellan kapsel och buffert försvinner och att bufferten homogeniseras. Emellertid kommer en viss inhomogenitet att kvarstå på grund av friktion i bentoniten. Denna kvarstående inhomogenitet har betydelse för konstruktionsförutsättningarna och den konfiguration (pelletar och block) med vilken bufferten deponeras. I bufferten leder dessutom uppvärmningen till termisk expansion av porvattnet. Om svällningen förhindras, bildas i stället ett svälltryck.

I kontaktytan mellan bufferten och återfyllningen uppstår en växelverkan genom att bufferten utövar ett svälltryck mot återfyllningen och vice versa. Eftersom det finns en skillnad i svälltryck, uppstår ett nettotryck mot återfyllningen, varvid bufferten sväller och återfyllningen komprimeras. Uppsvällningens storlek beror på buffertens och återfyllningens ursprungliga densiteter. Den är avhängig expansions- och kompressionsegenskaperna samt friktionen mot berget. Beräkningsmodeller för att analysera denna samverkan finns (både analytiska och numeriska).

Mekanisk växelverkan mellan buffert och kapsel uppkommer genom att bufferten genererar både tryckspänningar och skjuvspänningar. Växelverkan uppkommer också genom porvattnet, som bara genererar tryckpåkänningar och genom gas i bufferten, som också bara genererar tryckpåkänningar. Under vattenmättnadsprocessen förändras dessa tre variabler. Kapselns tyngd påverkar bufferten, medan buffertens tyngd på kapseln endast påverkar marginellt. Bergrörelser som uppstår i sprickplan, till exempel efter jordskalv, ger upphov till påkänningar på kapseln. Dessa förmedlas från berget genom bufferten. Processerna vid den mekaniska växelverkan mellan buffert och kapsel efter vattenmättnad, förstår man relativt väl. Osäkerheten består framför allt i bevätningens jämnhet, deponeringshålets ojämnheter och tryckupbyggnaden vid eventuella gasbildningar. En annan osäkerhet är kryprörelser orsakade av kapselns tyngd.

Växelverkan mellan buffert och närområdesberg orsakas bland annat av svälltryck från bufferten, konvergens av deponeringshål och skjuvrörelser i berget. Konvergens av deponeringshål kan i det närmaste försummas, se även avsnitt 26.10 Tidsberoende deformationer. I ett KBS-3H-förvar kommer först bentoniten att tränga genom den yttre perforerade supercontainern och vidare in i utrymmet mellan berget och containern. På lång sikt kommer containern att korrodera. Omvandlingen från järn till magnetit innebär en ökning av volym och ett ökat tryck mot berget och kapseln.

Svällningen leder till att lera tränger in i bergets sprickor. Svällningsegenskaperna medför också att en skada som uppstår i bufferten, till exempel efter kanalbildning och erosion, gasgenomträngning eller bergrörelser, kommer att svälla igen och läka.

På lång sikt kan kemiska förändringar i bufferten leda till att svällnings- och deformationsegenskaperna förändras, se avsnitt 25.5.8 Piping/erosion. Svällning förekommer även under vattenmättnadsfasen, se avsnitt 25.5.5 Vattentransport vid omättade förhållanden.

Återfyllningens svällnings- och kompressionsegenskaper är viktiga för Kärnbränsleförvarets funktion. Designen med block och pelletar i återfyllningen ställer framför allt krav på homogeniseringsförmågan dels mellan blocken och pelletfyllningen, dels för läkningen av erosionskanaler, men även svälltrycken och kompressionsegenskaperna är viktiga för till exempel buffertuppsvällning och påverkan på pluggen.

För silon i SFR studeras två typer av rörelser: dels sättning av silons botten, dels förflyttningar i silotoppen. Detta diskuteras i detalj i Pusch (2003). Efter förslutning kommer bentonitbufferten i silon att vattenmättas och ge ett svälltryck mot betongkonstruktionen och den omgivande sprutbetongen.

Även silon i SFR skulle kunna påverkas av bergrörelser som uppstår i sprickplan från jordskalv. Dessa skulle kunna ge upphov till påkänningar på betongkonstruktionen. Bergrörelserna förmedlas från berget genom väggbufferten.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

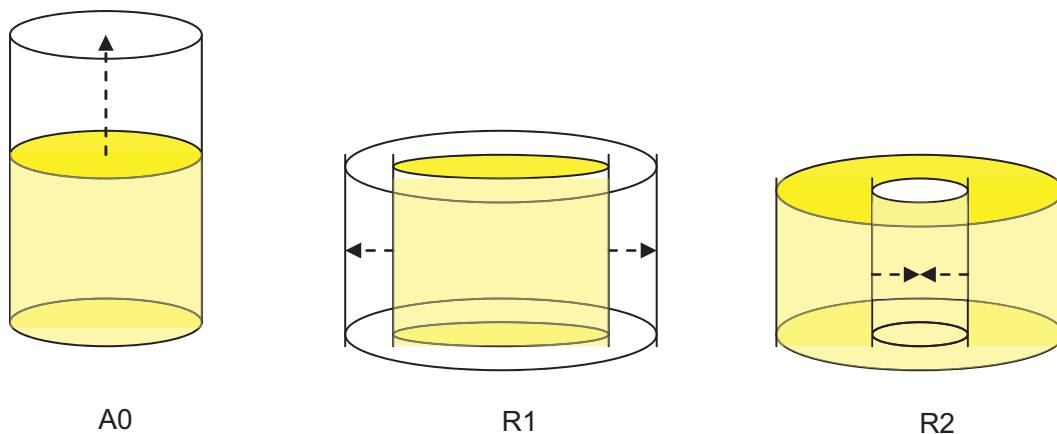
SKB bör utreda utvecklingen hos de mekaniska egenskaperna som en följd av geomekanisk och geokemisk växelverkan under långa tider, exempelvis under förändrade förutsättningar som klimatutveckling.

SSM ansåg att SKB bör utreda mer ingående inverkan av grundvattenkemi (framför allt jonstyrka) på lermaterialets elastiska, plastiska och viskösa egenskaper.

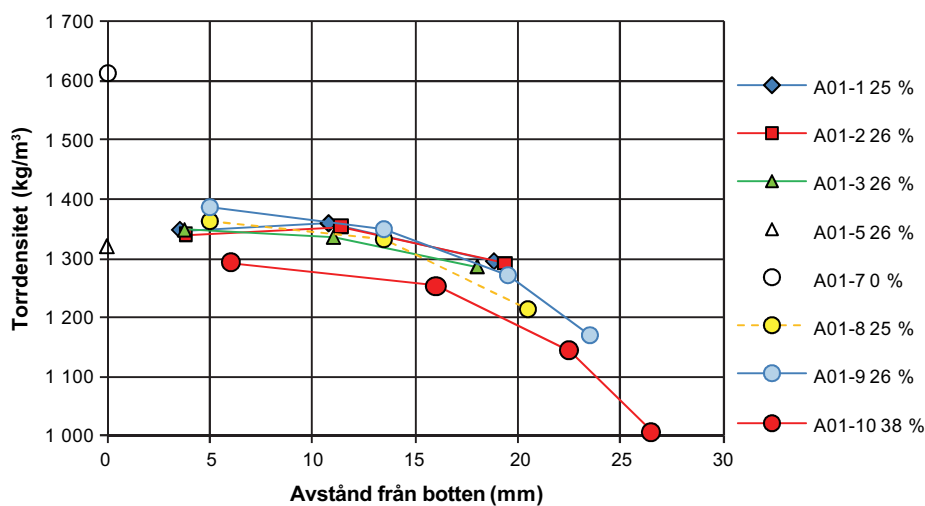
I NEA-granskningen av SR-Site (NEA 2012) diskuterades det om inte buffertens svällförmåga (och inte bara svälltrycket) skulle vara en säkerhetsfunktion i KBS-3-konceptet.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Omfattande studier pågår för att förbättra förståelsen av buffertens och återfyllningens förmåga att självläka och att fylla håligheter. En del resultat från de studierna finns avrapporterade i Dueck et al. (2011). En typ av försök har varit utsvällning av MX-80-bentonit i olika geometrier, se figur 25-15 och 25-16.



Figur 25-15. Olika geometrier för utsvällningsförsök. A0 visar axiell svällning, R1 radiell svällning utåt och R2 radiell svällning inåt (Dueck et al. 2011)



Figur 25-16. Exempel på resultat från axiella utsvällningsförsök i A0-geometrin från figur 25-15. Procentsiffran avser den procentuella utsvällningen.

Program

Buffertens förmåga att homogenisera och att fylla håligheter är avgörande för dess funktion i förvaret. Detta gäller framför allt för:

1. Homogenisering av buffertblock och pelletar vid vattenmättnaden efter installationen. Graden av homogenisering har direkt koppling till kravet på den installerade densiteten och konfigurationen.
2. Självläkningsförmågan efter piping med erosion. Detta kopplar indirekt till kraven på inflöden.
3. Självläkningsförmågan efter kolloidbildning med erosion.

Det är inte praktiskt att definiera en säkerhetsfunktion för buffertens svällförmåga. Svällförmågan är främst kopplad till initialtillståndet och är av mindre betydelse i den långsiktiga utvecklingen. Däremot kan svällförmågan koppla till förmågan att homogenisera och vara av stor betydelse för punkterna 1 och 2 ovan.

Ett laboratorieprogram har startats där ett flertal grundläggande renodlade försöksprinciper använts med axiell och radiell svällning och samtidig mätning av dessa tryck. De utförda försöken används även som modelleringsuppgift inom TF EBS.

Laboratoriedelen av detta projekt består av fyra delar:

- A. Grundläggande renodlade laboratorieförsök för att förbättra kunskapen om de ingående materialparametrarna.
- B. Friktionsförsök för att undersöka friktionen mellan buffert och berg och mellan buffert och kapsel. Denna friktion är en stor osäkerhet men är samtidigt mycket viktig för läkningsförmågan.
- C. Skalförsök av homogenisering av hålrum i bentonit som ska användas till prediktioner som ska föregå brytningen.
- D. Långtidshomogeniseringsförsök i rör för att utvärdera de teorier som förutsäger att friktion mot väggar ger kvarstående densitets- och svälltrycksgradienter.

De grundläggande laboratorieförsöken kommer i huvudsak att göras i den större försöksutrustning som illustreras i figur 25-17. Fördelen med den är att den ger större upplösning av densitetsfördelningen och innehåller ett flertal givare för mätning av radiella svälltryck.

Friktionsförsöken fortsätter. Bland annat ska friktionen mot andra material såsom koppar och berg studeras.

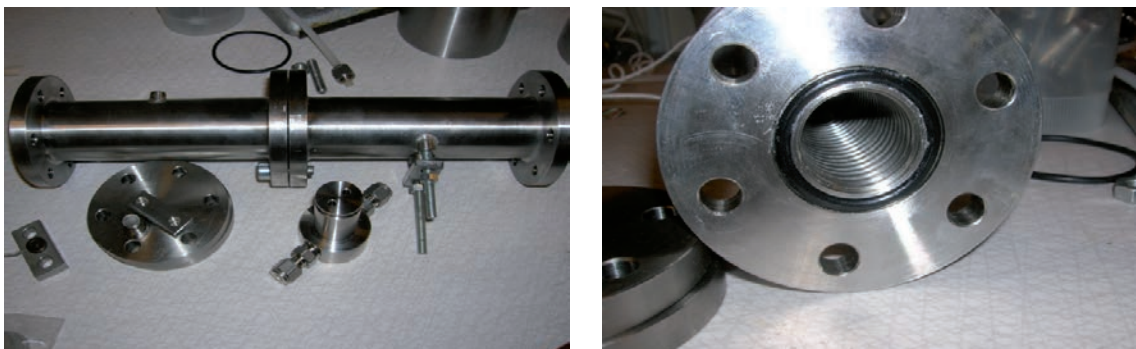
Ett skalförsök av homogenisering av bentonit i så kallad Lot-skala (30 centimeters diameter) monterades i december 2012. I bentonitblocket hade två större hålrum mot den simulerade bergväggen skurits ut. Försöket som innebär igensvällning av de utskurna hålrummen samt homogenisering kommer att pågå under större delen av 2013. Utvärdering av kvarstående densitetsgradienter kommer att göras genom noggrann provtagning vid brytningen som planeras till december 2013.

Ett långtidshomogeniseringsförsök i rör startade i mars 2012. Resterande försök startas under 2013. I dessa försök fylls ett tiotal rör, se figur 25-17, med längden 0,25–0,35 meter och diametern 2,5–3,5 centimeter med högkompakterad bentonit i ena halvan och bentonitpelletar i den andra. Vattentillgång finns i pelletedelen. I några försök mäts svälltryck, framför allt axiellt i ändarna men också radiellt på olika ställen. Genom att låta försöken stå olika lång tid kan densitetsfördelningen och svälltrycksutvecklingen studeras och kvarstående krypeffekten analyseras. Sammanlagt planeras tio sådana försök i långa rör.

Den huvudsakliga modelleringen görs inom TF EBS.

25.5.10 Advektion

Lösta ämnen kan transporteras med porvattnet genom tryckinducerat flöde. Processen har betydelse i bufferten under den omättade perioden, då en nettoströmning av vatten sker in till bufferten. Det viktigaste kravet på buffertmaterialet är att det ska förhindra strömning kring kapseln under mättade förhållanden. Detta krav upprätthålls så länge som den hydrauliska konduktiviteten är låg. Hydraulisk konduktivitet diskuteras i avsnitt 25.5.6 Vattentransport vid mättade förhållanden. Advektiv transport kan därför bara förekomma om bufferten omvandlats eller gått förlorad. Detta diskuteras i avsnitt 25.5.14 Montmorillonitombildning och 25.5.19 Kolloidfrigörelse/erosion.



Figur 25-17. Exempel på försöksuppställning med långa rör. Detta rör är gängat för att maximera friktionen mellan rör och bentonit.

25.5.11 Diffusion

Diffusionsprocessen är starkt sammankopplad med nästan alla kemiska processer i bufferten, genom att den svarar för fram- och borttransport av reaktanter och reaktionsprodukter. Därmed är diffusion en central process för hela den kemiska utvecklingen i bufferten.

Den diffusiva transportkapaciteten beskrivs vanligtvis med diffusionskoefficienter som är unika för varje typ av molekyl eller jon och beror också i princip på alla närvarande molekyler och joner. Typiskt är diffusionskoefficienterna i bufferten reducerade med en faktor 50 eller mer i förhållande till rent vatten.

Diffusion i återfyllningen och diffusion i väggbufferten i silon i SFR kan hanteras på samma sätt som diffusion i bufferten.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SSM var positiv till att SKB eftersträvar en ökad grundläggande förståelse för transportegenskaper i bentonit. SKB bör dock beakta hur det egna angreppssättet förhåller sig till andra alternativ, till exempel Maxwell-Stefansmetod (Krishna och Wesselingh 1997), och analysera om alternativ konceptuell förståelse skulle medföra konsekvenser för Kärnbränsleförvarets långsiktiga säkerhet.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

I försöket alternativa buffertmaterial (ABM) placerades dryga tiotalet olika bentoniter sida vid sida och tilläts jämvikta mot Äspövatten under perioden 2006–2009. De olika montmorilloniterna i respektive bentonit hade vid installationstillfället olika motjoninnehåll, vissa dominerades av natrium, andra av kalcium, etc. Det gjorde att man vid brytningen kunde studera jonbytesprocesser mellan de olika bentoniterna sinsemellan samt mellan bentoniterna och Äspövattnet (Svensson et al. 2011). Ett försök att modellera detta med en diffusions- och jonbytesmodell har gjorts och rapporteras under 2013.

Modellen baseras på en tvådimensionell axelsymmetrisk geometri av deponeringshålet och inkluderar kopplad diffusion och katjonbyte av natrium, kalium, kalcium och magnesium (som en kloridlösning) i en stapel av 30 bentonitblock av elva distinkta initiala kompositioner, se figur 25-18. I modellen är jondiffusion tillåtet mellan de individuella bentonitblocken och mellan bentonitblocken och det sandlager som fyller mellanrummet mellan blocken och berget (den rödfärgade zonen runt bentonitpaketet i figur 25-18). De effektiva diffusionskoefficienterna för enskilda bentonitblock uppskattades baserat på torrdensiteten hos bentoniten och en uppskattning av temperaturberoendet hos diffusionskoefficienter under simuleringen.

Tillsammans med en enkel beskrivning av skillnaden i hydrauliska randvillkor i den övre och nedre delen av deponeringshålet lyckades den relativt enkla modellen mycket väl med att reproducera experimentella data, se figur 25-19. Detta gäller särskilt för de dominerande motjonerna: kalcium och natrium. De uppmätta fraktionerna av magnesium i den övre delen av försöket var svårare att beräkna. Detta kan möjligtvis bero på att andra reaktioner än jonbyte har varit involverade.

Program

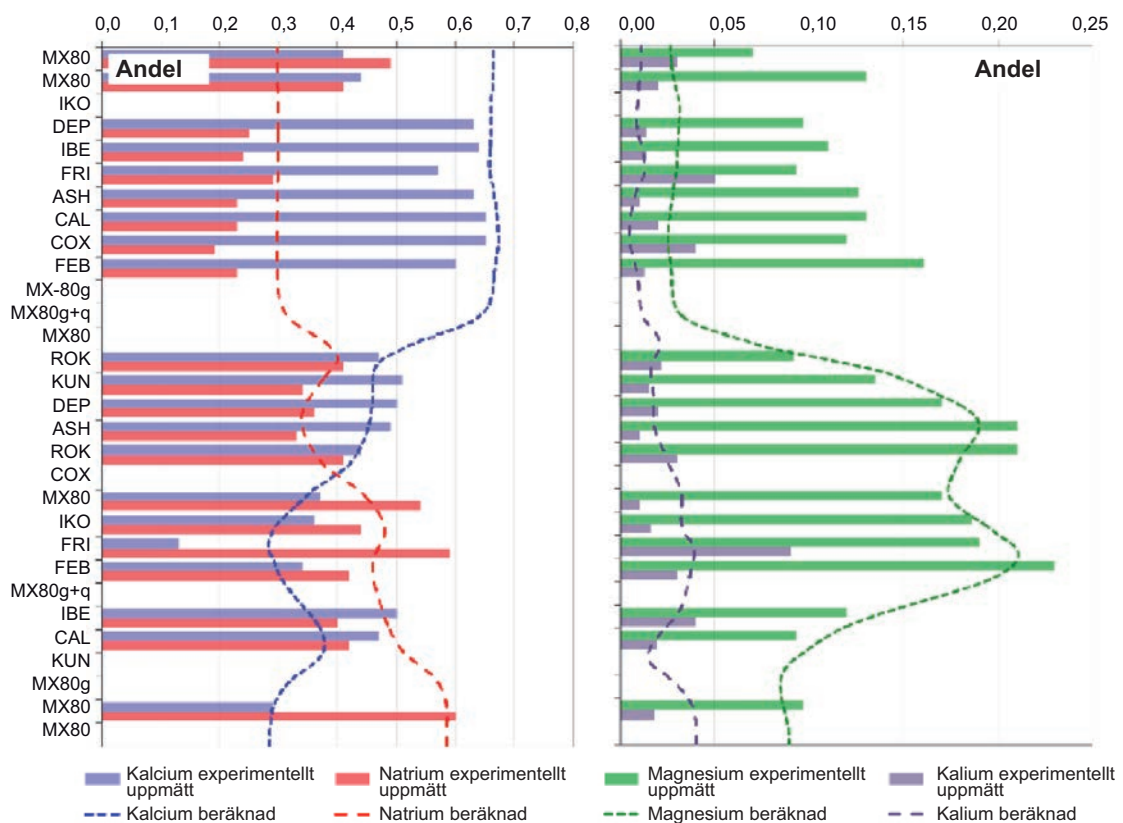
SKB bedriver inget separat program för att studera diffusion eller diffusivitet. Diffusion förekommer dock som en naturlig process i många försök och modeller och data kan där utvärderas/verifieras. Ett exempel på detta är ABM-försöket som beskrivs ovan. Nästa paket i ABM bryts under 2013 och det kan då vara av intresse att göra en upprepad modellering av diffusion/jonbyte.

25.5.12 Osmos

Buffertens tätande egenskaper, huvudsakligen högt svälltryck och låg hydraulisk konduktivitet, är intimt kopplade till bentonitens affinitet för vatten. Vattenaffiniteten hos bentonitmaterial beror huvudsakligen på andelen montmorillonit samt på detaljerna i montmorillonitens mineralstruktur. För ett givet bentonitmaterial avtar affiniteten med ökande mängd upptaget vatten. Sambandet kan mätas och brukar beskrivas med en så kallad vattenhållningskurva. Även andra komponenter i ett förvarssystem, till exempel omgivande berg och salt i grundvattnet, har affinitet för vatten i olika grad, varvid konkurrens om vattnet uppstår. Bentonitens svälltryck påverkas därigenom analogt med en osmotisk tryckförändring i en saltlösning.



Figur 25-18. Tredimensionell representation av den tvådimensionella axelsymmetriska modellen (genererad av Comsol Multiphysics), den visar bentonitblocken och ett sandskikt som omger bufferten (två centimeter tjockt, i brunt). Färger anger typen av bentonitblock i modellen. Den totala höjden på stapeln är tre meter (tio centimeter för varje block), medan de inre och yttre diametrarna är 0,11 respektive 0,3 meter.



Figur 25-19. Experimentella och beräknade motjonsfraktioner i ABM-paket 1, efter 880 dagar i berget.

SKB använder termen osmos för hur bentonitens hydrauliska konduktivitet och svälltryck påverkas av grundvattnets salthalt.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Osmos är ett viktigt kolloidkemiskt fenomen i ett system av bentonitlera och vatten som bestämmer många egenskaper hos bentonitleran. SSM instämde med SKB att en bättre förståelse av egenskaper hos kalciumdominerade system är nödvändig. Dessutom såg SSM positivt på att SKB planerar arbete med molekylärdynamiska simuleringar av jonfördelningar i porvattnet samt av hur koncentrationskillnader med en extern lösning upprätthålls i jämvikt. Även de planerade ytterligare studierna av hydraulisk konduktivitet och svälltryck som funktion av salthalt för materialet i silon i SFR, bedömdes som värdefulla.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

Ämnesområdet osmos kopplar delvis till erosion och vissa aspekter behandlas i avsnitt 25.2.19 Kolloidfrigörelse/erosion. I övrigt är förståelsen för inverkan av förhöjd salthalt på buffertens egenskaper tillräcklig.

Program

Salthalten kan ha stor betydelse för silobuffertens egenskaper i SFR eftersom densiteten är så låg. Ett program med provtagning och utvärdering av silobuffertens hydromekaniska egenskaper pågår.

25.5.13 Jonbyte/sorption

I montmorillonit upprätthålls elektrisk laddningsneutralitet genom att positivt laddade motjoner i porvattnet kompenserar de negativt laddade mineralflaken. Under saltfria förhållanden kommer därför motjonerna att vara ackumulerade kring montmorilloniten, trots att de är diffusiva. I kontakt med en saltlösning kommer emellertid ett laddningsbevarande diffusivt utbyte att ske mellan joner associerade med montmorilloniten och positivt laddade joner i den yttre lösningen tills dess att jämvikt råder. Omfördelning av motjoner på detta sätt kallas jonbyte.

Olika typer av motjoner associeras olika hårt till montmorillonityterna, bland annat beroende på dess valens, förmåga att hydratiseras och förmåga att polariseras elektriskt. Motjonsfördelningen i jämvikt beror därför på koncentrationerna hos alla positiva joner i den yttre lösningen.

I en buffert kommer motjonsuppsättningen att variera med tiden och beror på grundvattenkemin och bentonitens uppsättning av accessoriska mineral. En bentonit i jonbytesjämvikt med ett typiskt svenskt grundvatten på förvarsdjup är kalciumdominerad.

Olika motjonsuppsättningar leder till olika fysikaliska egenskaper hos bentoniten. Vid låga densiteter har exempelvis en kalciumdominerad lera lägre svälltryck än motsvarande natriumdominerad variant. Förmågan hos bufferten att bilda kolloider är också beroende på motjonsuppsättningen.

Den totala jonbyteskapaciteten bestäms rutinmässigt laborativt genom att fullständigt jonbyta leran till en specifik jon (till exempel kopparjon, Cu^{2+} , eller ammoniumjon, NH_4^+).

Utöver jonbytesprocessen har bentonit också förmågan att sorbera vissa joner genom ytkomplexbildning på de ingående mineralen, speciellt på montmorillonitflakens kanter. Joner bundna till leran på detta vis är fixerade och därmed inte diffusiva. Ytkomplexbildningen är starkt pH-beroende, med mer omfattande fixering vid högre pH-värden. Protoninteraktion med flakkanterna innebär också att dessa kanter kan vara positivt laddade under vissa pH-förhållanden.

Sorption i återfyllningen och i väggbufferten i silon i SFR kan hanteras på samma sätt som sorption i bufferten.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SSM ansåg att SKB:s arbete med jonbyte och sorption bör utvidgas och omfatta de specier som kan förekomma i Kärnbränsleförvarets miljö och som kan ha stor betydelse för förvarets långsiktiga säkerhet, till exempel tvåvärt och trevärt löst järn, envärd och tvåvärd löst koppar samt andra ämnen som ammonium.

Dessutom bör SKB utreda växelverkan mellan jonbyte/sorptionsprocesser och andra geokemiska processer såsom järn- och kopparkorrosion samt mikrobiologiska processer som involverar olika kväveföreningar.

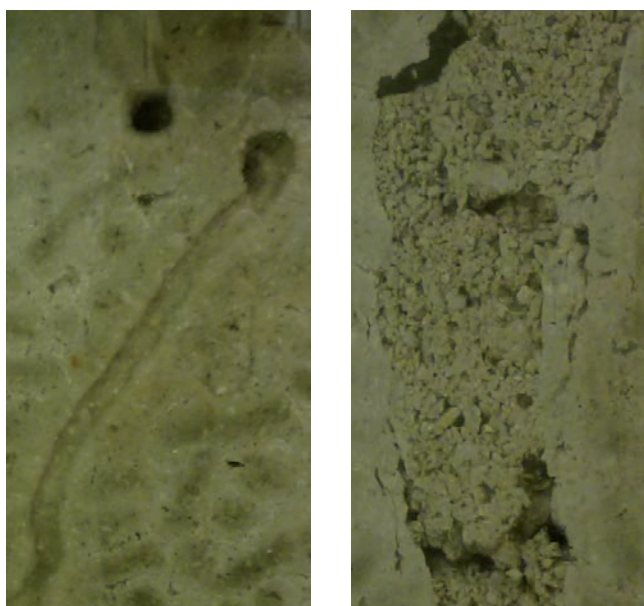
SSM ansåg att SKB bör studera kopplingen mellan elektrostatisk växelverkan och selektivitet i ett system med högt laddade partiklar och en lösning av låg elektrolytkoncentration.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Diffusion/jonbyte har studerats och utvärderats i ABM, se avsnitt 25.5.11 Diffusion. I fältförsöket placerades dryga tiotalet olika bentoniter sida vid sida och tilläts jämvikta mot Äspövatten under perioden 2006–2009. De olika montmorilloniterna i respektive bentonit hade vid installationstillfället olika motjoninnehåll, vissa dominerades av natrium, andra av kalcium, etc. Det gjorde att man vid brytningen kunde studera jonbytesprocesser mellan de olika bentoniterna sinsemellan samt mellan bentoniterna och Äspövattnet (Svensson et al. 2011). De internationella grupperna som analyserar ABM-experimentet har tillsammans gjort en unik studie där man jämfört olika metoder för katjonutbyteskapacitet mot varandra. Grupperna har också valt ut en specifik metod och jämfört spridningen från de olika laboratorierna. Detta arbete gjorde att man gemensamt kunde identifiera faktorer som bidrog till osäkerhet och spridning mellan gruppernas resultat (Dorhmann et al. 2012a, b).

Jonbyte kan ha stor betydelse för piping och erosion. Figur 25-20 visar resultat från Eva-projektet där vatten med olika sammansättning har använts för att generera piping i en pelletfyllning. Jonbytet sker mycket snabbt i bentoniten närmast kanalen och i fallet med kalcium förloras svällförmågan eftersom densiteten är låg.

Jonbytet har också stor betydelse för utvärderingen av kolloidfrigörelse/erosion, se avsnitt 25.5.19. Karnland et al. (2011) redovisar jonbyteskoefficienterna för natrium och kalcium i bentonit med låga vatten-till-fast-fas-förhållanden, och resultaten från den studien ger därmed en tillförlitlig bas för beräkning av fördelningen katjoner i en bentonitbuffert med en relativt hög densitet. Resultaten från studien är i god överensstämmelse med mätningar av jonbyteskoefficienter i system med höga vatten-till-fast-fas-förhållanden.



Figur 25-20. Bildning av piping i en pelletfyllning. Vänster: natriumkloridlösning. Höger: kalciumkloridlösning.

Program

Jonbyte kan ha stor betydelse för silobuffertens egenskaper i SFR eftersom densiteten är så låg. Ett program med provtagning och utvärdering av silobuffertens hydromekaniska egenskaper pågår.

I KBS-3-konceptet är bufferten relativt tunn och effekten av sorption är därför bara viktig för relativt kortlivade radionuklider. Resultaten från SR-Site visar att sannolikheten för tidiga kapselskador är liten. Bidraget till dos/risk från kortlivade radionuklider är därför relativt oväsentligt. I silon i SFR är sorptionen på cement den dominerade retardationsmekanismen. Sorptionsstudier av radionuklider i bentonit är därför inte prioriterat.

Jonbyte ingår som en integrerad del i många andra processer, till exempel i avsnitten 25.5.8 Piping/erosion, 25.5.9 Svällning och 25.5.19 Kolloidfrigörelse/erosion.

25.5.14 Montmorillonitomvandling

De önskvärda fysikaliska egenskaperna hos bufferten, främst svälltryck och låg hydraulisk konduktivitet, beror på montmorillonitens affinitet för vatten. Affiniteten påverkas av ändringar i jonkoncentrationen i grundvattnet och av ändringar i montmorillonitens mineralstruktur. Den mineralogiska stabiliteten hos montmorilloniten är därför av avgörande betydelse för buffertens funktion.

Montmorillonit kan vara stabil i hundratals miljoner år i sin bildningsmiljö, men förändringar i den geokemiska miljön kan leda till en relativt snabb förändring av mineralstrukturen.

I naturen förekommer mineral med likartad mineralstruktur, men med stora skillnader i flakladdning. Om laddningen är nära noll, till exempel i pyrofyllit, är affiniteten för vatten obetydlig, vilket ger radikalt andra egenskaper än hos montmorillonit. En mindre ökning av montmorillonitens flakladdning och därmed fler balanserande katjoner, leder till större affinitet för vatten. Ökar emellertid laddningen tillräckligt mycket, kommer jonerna att fixeras till mineralflaken med en minskad affinitet för vatten som följd. Slutprodukten i en sådan process är glimmermineral, för vilka affiniteten för vatten också är obetydlig. De typiska egenskaperna hos montmorilloniten är således en följd av en medelhög flakladdning.

Fixering av laddningsbalanserande joner beror till hög grad på jonens egenskaper. Kaliumjoner fixeras till exempel vid lägre flakladdning än natriumjoner, vilka i sin tur fixeras vid lägre laddning än kalciumjoner. Illit avser material med en flakladdning mellan den hos montmorillonit och glimmer. Kaliumjoner fixeras till viss del i en illitlera, men inte natrium- eller kalciumjoner. Fixering av flervärda joner, vanligen järn eller magnesium, kan även ske via en brygga av hydroxid, vilket ger ett kloritmineral.

För att en montmorillonit ska omvandlas i riktning mot illit eller klorit krävs således en ökning av flakladdningen, vilket kan ske bland annat genom:

- Frigörelse av kisel.
- Utbyte av aluminium.
- Förändring av valens i strukturen (järn).

I silon i SFR kommer den vattenmättade bentoniten att vara i direkt kontakt med betong och pH i vattnet kan därför bli mycket högt. Det råder en del osäkerheter om hur bentonit reagerar på högt pH.

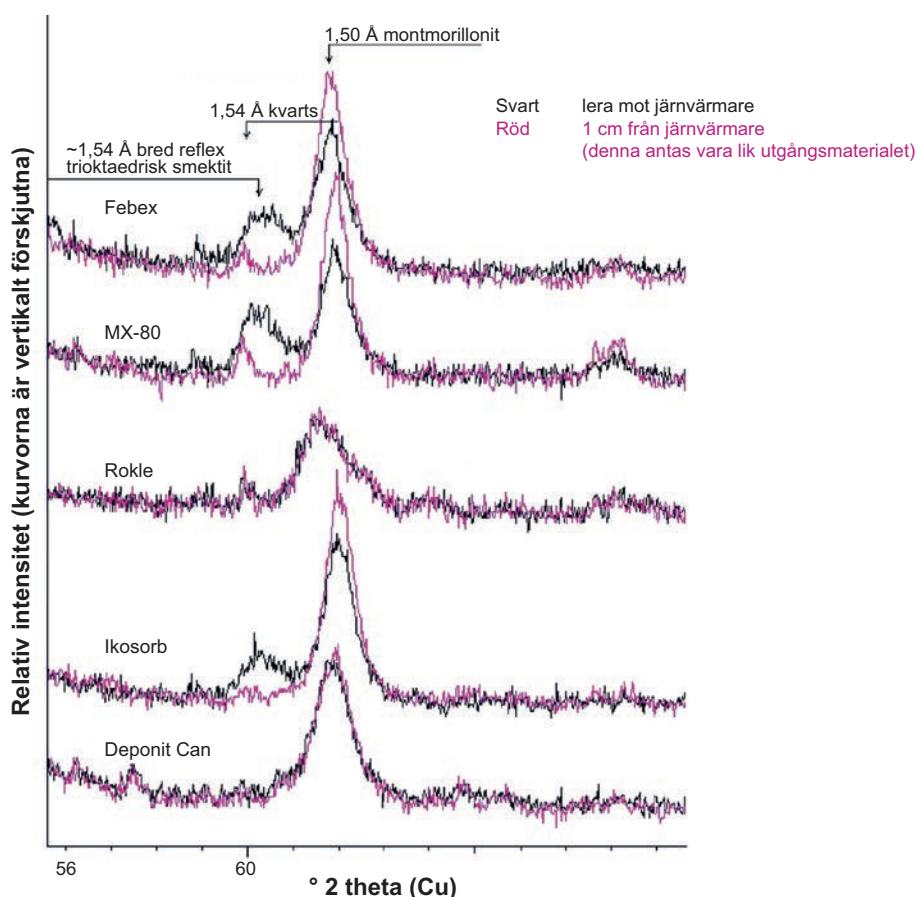
Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SSM ansåg att SKB bör mer ingående studera interaktioner mellan bentonitlera och låg-pH-cement samt orsaker till den utökade jonbyteskapaciteten och de uppmätta reologiska förändringarna i Lot-försöket. Dessutom bör den genom hydrolys långsamma upplösningen av montmorillonit och dess inverkan på materialets långsiktiga omvandling studeras.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

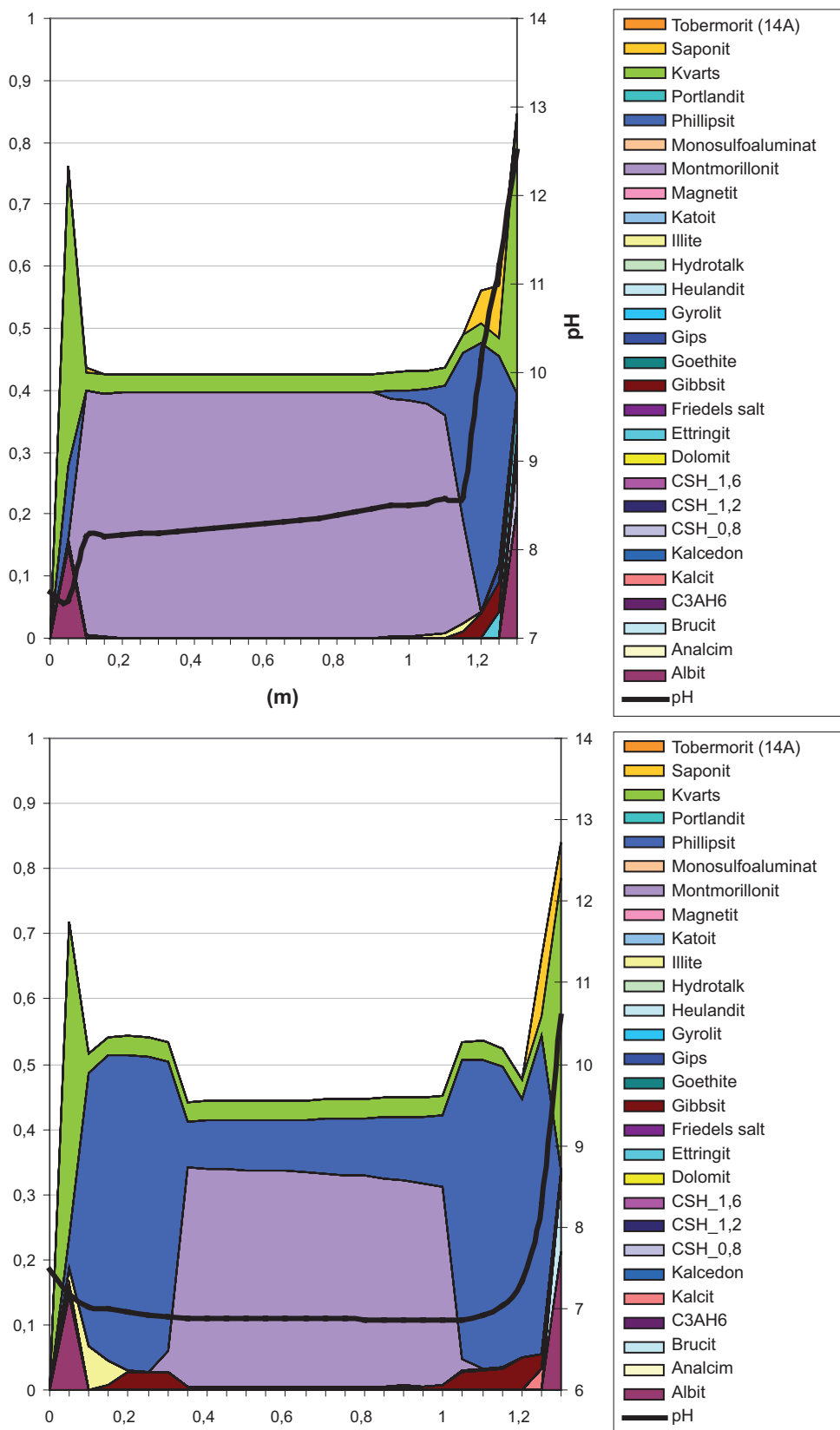
Cypernprojektet har avslutats, fas III finns avrapporterat (Alexander et al. 2011) och fas IV kommer att avrapporteras under 2013. Syftet med projektet var att studera om det hade skett mineralogisk omvandling av naturlig bentonit på Cypern, där bentoniten har varit i kontakt med grundvatten med pH-värden i samma storleksordning som låg-pH-cement. De alkaliska grundvattnen på Cypern härrör från serpentinisering av ophioliter. I närheten av den övergivna byn Parsata finns rika förekomster av smektit som har varit i kontakt med alkaliska grundvatten under mycket långa tider (i storleksordningen hundratusen år). Mineralogiska studier av kontaktzon mellan smektit och vatten visar att reaktionerna har varit minimala. En möjlig omvandling från smektit till palygorskit har identifierats, men omfattningen är mycket liten trots den långa tidsskalan.

Resultat från Lot-projektet visade att magnesiumhalten ökade nära kontakten med värmaren (Karnland et al. 2009). Detta har också observerats av Fernandez och Villar (2010) och kan vara relaterat till en högre löslighet av magnesium jämfört med de andra strukturella katjonerna i smektit – med andra ord, magnesium upplöses först (inkongruent). För att gå djupare i den frågan studerades bentoniterna i ABM (avsnitt 25.4.4 Bentonitsammansättning) med avseende på ökning av magnesiuminnehåll och möjliga strukturella förändringar. Analyserna visade att många av ABM-materialen hade ett ökat magnesiuminnehåll i kontaktytan med värmaren (Kaufhold et al. 2013). I infraröd-spektret visade flera av materialen en något förhöjd intensitet vid 680 per centimeter (cm^{-1}), vilket kan förklaras med förekomst av anhydrit eller saponit (trioctaeder(2:1)mineral). Reflektion från röntgendiffraktion (XRD, d60) stöder teorin om bildning av trioctaedermineral i vissa av proverna, se figur 25-21. Studierna av ABM-materialen indikerar att de uppför sig olika under simulerade förvarförhållanden redan efter en så kort tid som cirka två år. Inga direkta slutsatser om stabiliteten hos de olika materialen kan dock dras från ABM. Materialen har varit i såväl elektrisk som hydraulisk kontakt med varandra och det innebär också att de kan ha påverkat varandra. Upptaget av ABM-paket 2 under 2013 kommer förhoppningsvis att ge ytterligare insikt i frågan.



Figur 25-21. XRD d(060)-reflektion av utvalda prover från ABM (Kaufhold et al. 2013). Det finns kompletterande IR-data och kemidata som stödjer observationerna.

Interaktionen mellan cement och bentonit har modellerats som en del av underlaget för SR-PSU. Syftet med studien var att ytterligare belysa betydelsen av osäkerheter i data och antaganden för stabiliteten av montmorillonitkomponenten i silobufferten i SFR. Ett exempel på resultat finns i figur 25-22.



Figur 25-22. Sammansättningen av silobufferten efter 30 000 år för referensfallet (övre) och för ett fall med förhöjd diffusivitet (nedre).

Program

Olika omvandlingsmodeller finns publicerade, och en modell framtagen av Huang et al. (1993) har använts av SKB för att motivera temperaturkriteriet för ett kärnbränsleförvar. I den modellen har det kinetiska uttrycket och associerade parametrar, systematiskt bestämts genom laborieförsök och resultaten är verifierade mot naturliga system. Eftersom omvandlingen sker långsamt vid låga temperaturer genomfördes laborieförsöken vid betydligt högre temperaturer (mer än 200 °C) än vad som kommer att råda i ett kärnbränsleförvar. Beräkningar av omvandling i ett kärnbränsleförvar innefattar därför omfattande extrapolering, vilket minskar tillförlitligheten i beräkningarna. SKB har därför valt att inte använda den kinetiska modellen för att bedöma montmorillonitstabilitet i SR-Site, utan använder i stället en jämförelse med naturliga system. Därför pågår studier av omvandling vid måttligt förhöjd temperatur. Processen accelereras med andra möjliga variabler, till exempel genom förhöjd kaliumkoncentration och genom att hålla kiselhalten låg i montmorillonit/vatten-systemet.

Laborieförsöken genomförs med renad montmorillonit med olika motjoner (natrium, kalium, magnesium och kalcium) som exponeras för motsvarande saltlösningar och förvarsliknande temperaturer. Lösningarna analyseras successivt under försökets gång. Efter brytning av försöken analyseras montmorilloniten med avseende på sammansättning och svällbarhet.

De torra förhållandena i Forsmark gör att det är intressant att studera montmorillonitomvandling under omättade förhållanden. Couture (1985) rapporterade att bentonit som utsatts för upphettad vattenånga tappade en stor del av sin svällförmåga. Däremot identifierades inga mineralogiska förändringar. Därför genomförs temperaturförsök med montmorillonit som har varierande vattenmättnadsgrad för att avgöra om vattenånga har någon speciell inverkan på svällningsegenskaperna. Om så är fallet kommer inverkan att kvantifieras för olika exponeringstider och temperaturer. Vidare innefattar arbetet försök att identifiera mekanismen bakom en sådan ångpåverkan.

Cement och bentonit är inte helt kompatibla med varandra. Interaktion mellan cement och bentonit studeras dock både i kärnbränsleprogrammet (bara låg-pH-cement) och inom programmet för låg- och medelaktivt avfall, för silon i SFR. I kärnbränsleprogrammet (KBS-3) är frågan av underordnad betydelse, eftersom kravet på att cementkomponenter ska ha ett porvatten med $\text{pH} < 11$ gör att effekten av interaktionen minimeras. I silon i SFR kommer interaktionen att ske, men där kan den accepteras eftersom tidsskalan är kortare. Det finns därför i princip inga unika frågeställningar för koncepten i Slutförvaret för långlivat avfall, SFL. Kraven på barriärernas beständighet i SFL är dock större än för silon i SFR (längre tidsskalor), vilket gör att kravet på kunskapsunderlaget kan vara större. De studier som skulle kunna vara aktuella är:

- vidareutveckling och testning av kopplade modeller,
- laboriestudier av enskilda processer,
- fältförsök (utvärdering av experimentet Concrete and Clay),
- analogier,
- teknikutveckling (mer kompatibla material).

Det detaljerade programmet kommer att anpassas till de förvarskoncept som prioriteras.

I projektet Concrete and Clay kommer långtidförsök med bentonit och cement att installeras. Försöket är en del av SKB:s långsiktiga experimentprogram och inga resultat förväntas under perioden för det här forskningsprogrammet.

25.5.15 Järn/bentonit

Metalliskt järn i anaerob miljö korroderar normalt sett mycket långsamt under bildning av järn(II)-hydroxid och vätgas. I en miljö med bentonitlera kan man dock tänka sig att järn(III) i montmorillonit kan interagera med det metalliska järnet genom bildning av järn(II). Reduktionen av järn(III) till järn(II) i montmorillonit skulle potentiellt påverka mineralets flakladdning och därmed också dess samspel med vatten och dess benägenhet till mineralomvandling. Korrosionen av järn kan dessutom leda till ett högre pH-värde, vilket påverkar lösligheten av kisel och även montmorillonitens stabilitet.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Förutom järn-bentonit-interaktioner ansåg SSM att SKB även bör studera växelverkan mellan korrosionsprodukter från kopparkapseln och bentonitbufferten.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

I ABM-experimentet undersöks ett antal olika bentoniter med respektive montmorillonit med olika egenskaper för att studera om det finns skillnader i egenskaper eller långtidsstabilitet. Testerna sker under accelererade, men realistiska förhållanden. Preliminära undersökningar indikerar att vid buffertdensitet kan inga eller mycket små observationer göras som tyder på montmorillonit-omvandling (Svensson et al. 2011). Däremot har en ökning i förhållandet järn(II)/järn(III) observerats i flera leror i ABM. Denna ökning kopplas till bildandet av järn(II)-faser från korrosionen, men man kan inte utesluta partiell reduktion av strukturellt järn(III) i montmorillonit.

Även i TBT-försöket (Temperature buffer test) dras liknande slutsatser, dock utan en ökning av järn(II) i leran (Åkesson et al. 2012b). Dessa resultat är i kontrast till försök som gjorts med lågt ler/vatten-förhållande där diverse omvandlingsreaktioner av montmorillonit har identifierats, omvandlingsprodukten varierar men beror huvudsakligen på pH och temperatur (Guillaume et al. 2004, Jodin-Caumon et al. 2010, Charpentiera et al. 2006, Perronnet et al. 2008).

Korrosion av gjutjärn har också studerats i närvaro av bentonit, bland annat i EU-projektet NF-Pro (Near-Field Processes). Ytterligare analyser ger fortsatt stöd till de slutsatser som redovisats i Fud-program 2010. I järn- och stålprovernans närområde innehåller bentoniten förhöjda halter av järn till följd av korrosion. Det mesta av järnet förekommer i lermineralet och endast en mindre del förekommer i form av amorf eller kristallin järnoxid.

De prover som nu analyserats har exponerats under längre tid (2–3,5 år) än de prover som analyserats i tidigare faser av experimentet NF-Pro (Milodowski et al. 2009). Analys visar att porvattnet nära den korroderande metallen innehåller höga salthalter och att en fällning av natriumklorid bildats. Detta har inte observerats i experimentets tidigare faser, men tros bero på att korrosionen av järn (stål) konsumerar porvatten så att det med tiden uppstår en dränering av bentoniten i den korroderande metallens närhet. I takt med att vattnet konsumeras stiger den lokala koncentrationen av salter och vid mättnad sker utfällning.

Program

Interaktion mellan järninsatsen och bentonitbufferten kan bara ske om kopparkapseln är defekt. I SR-Site är det bara aktuellt i fallet med skjuvskada och interaktionen mellan insatsen och bentoniten antogs ha en försumbar effekt. Detta identifierades dock som en kvarstående osäkerhet. Vidare studier behövs därför inom området. Dels behöver mängden montmorillonit på ett bättre sätt kvantifieras före och efter experimenten. Försök till anrikning av omvandlingsprodukter bör också testas, samt bättre karakterisering om vilka järnfaser som verkligen bildas. Tre nya ABM-paket installerades under slutet av 2012. Ytterligare ett ABM-paket bröts under våren 2013. SKB har vid granskningen av ABM-arbetet blivit rekommenderade att använda rumsligt högupplösta analyser med mikro-Ramanspektroskopi, vilket skulle ge mer information om kontaktzonen mellan järn och bentonit, samt möjliggöra korrekt identifiering av bildade korrosionsprodukter. Det är också viktigt att öka kunskapen om hur montmorillonitens egenskaper påverkas om delar av det strukturella järnet reduceras. En mycket stor handskbox installeras vid Äspölaboratoriet under 2013 för att kunna findela och analysera vissa typer av prover i en syrefri miljö.

25.5.16 Koppar/bentonit

Koppar och bentonit har valts som barriärer i KBS-3-konceptet, eftersom de inte borde påverka varandra i någon nämnvärd omfattning. Lösligheten av metallisk koppar under förvarsförhållanden är så låg att mängden kopparjoner som kan interagera med bentoniten är försumbar. Lösligheten av järn(III) i bentoniten är också så låg att den inte borde påverka kopparn.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Förutom järn-bentonit-interaktioner ansåg SSM att SKB även bör studera växelverkan mellan korrosionsprodukter från kopparkapseln och bentonitbufferten. SKB bör utreda den kemiska sammansättning av koppar som initialt korroderas med kvarvarande syre och senare med reducerande ämnen såsom sulfider i bufferten. Dessutom bör SKB belysa om interaktionerna mellan kopparkorrosionsprodukter och bentonit möjligen kan medföra lägre koncentrationer av kopparjoner i bentonitporvatten i jämförelse med koncentrationer av kopparjoner i jämvikt med sekundära kopparmineral. Detta skulle i så fall kunna påverka korrosionsförloppet. Inverkan av korrosionsprodukterna på buffertens långsiktiga geokemiska, kolloidkemiska samt geomekaniska egenskaper bör vidare utredas.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Sedan Fud-program 2010 har egenskaperna hos MX-80-bentonit som jonbytt med koppar(II) testats (avrapporeras under 2013). Slutsatsen är att den jonbytta bentonitens egenskaper i allt väsentligt överensstämmer med en bentonit som jonbytt med kalcium. (Carlsson 2008) har också studerat interaktionen mellan kopparkorrosionsprodukter och bentonit och kan inte heller konstatera någon påverkan på bentonitens egenskaper.

Program

I fältförsök som genomförts vid Äspölaboratoriet (Lot-försöket) har en marginell ökning av bentonitbuffertens katjonsutbyteskapacitet (CEC) noterats i närheten av värmare. En tänkbar förklaring till ökningen är en redoxreaktion mellan metallen i värmarna och bentoniten. Därför har en studie med laboratorieförsök med bentonit i direktkontakt med metallisk koppar inletts. Syftet är att identifiera om en sådan process verkligen äger rum, och i så fall, att kvantifiera den med mätning av bentonitens CEC. De inledande försöken genomförs med tunn kopparplåt/folie som placeras i en bentonit-slurry som i sin tur placerats i en anaerobbox. Försöken genomförs inledningsvis med en järnrik bentonit (från Ashapura Co.) samt med en renad och jonbytt montmorillonit från samma bentonit.

25.5.17 Lösning/fällning föroreningar

Den del av buffertmaterialet som inte utgörs av montmorillonit består av andra vanliga mineral, till exempel kvarts, fältspater, gips och kalcit, samt små mängder organiskt material. De accessoriska mineralen räknas här till materialets föroreningar, då de inte bidrar till buffertens tätande egenskaper. I förvarsmiljön kan mineralen lösas upp och ibland åter fällas ut, beroende på vilka förhållanden som råder.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I granskningen av Fud-program 2010 hade SSM inga synpunkter vad gäller lösning/fällning av föroreningar.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Den geokemiska utvecklingen i bufferten modellerades i SR-Site. De aspekter som beaktades var:

1. Inverkan av perioden med förhöjd temperatur.
2. Processerna som äger rum då bentoniten mäts.
3. Den vattenmättade bentonitens växelverkan med det lokala grundvattnet.

Inga säkerhetsfunktioner hos bufferten är direkt kopplade till den här utvecklingen, men en utvärdering gjordes för att avgöra om utvecklingen indirekt kan äventyra buffertens säkerhetsfunktioner.

Den geokemiska utvecklingen av silobufferten beskrivs som en del av SR-PSU. Här är dock fokuset inriktat på montmorillonitens stabilitet. Detta beskrivs i avsnitt 25.5.14 Montmorillonitombildning.

Program

SKB bedriver inget specifikt program för upplösning/utfällning av föroreningar i bufferten eller för buffertkemins utveckling. Dessa processer kommer dock in som en naturlig del i många andra processer (se till exempel avsnitten 25.4.4, 25.5.8, 25.5.11, 25.5.14, 25.5.15 och 25.5.19.)

25.5.18 Cementering

Cementering är ett samlingsbegrepp för en uppsättning processer som leder till reologiska förändringar eller försämrade svällegenskaper hos bufferten. Effekten är emellertid så viktig att beakta för bufferten, att den är samlad under en rubrik. Typiskt orsakas cementering av mineralutfällningar i bentonit och kopplingarna är därför starka till andra processer.

Det finns två huvudskäl till att effekten av cementering är viktig att beakta i en bentonitbuffert:

- Förhöjd hydraulisk konduktivitet. Cementering orsakad av mineralutfällningar kan sänka porositeten. I icke-svällande material innebär detta oftast en sänkning av den hydrauliska konduktiviteten. I bentonit är det emellertid inte porositeten, utan samspelet mellan vatten och montmorillonit som primärt bestämmer den hydrauliska konduktiviteten.
- Förhöjd skjuvhållfasthet. Cementering kan leda till en förhöjd skjuvhållfasthet av bufferten. En förskjutning av det omkringliggande berget (till exempel ett jordskalv) kan då leda till att för stora spänningar överförs till kapseln, vilket kan öka risken för kapselskada.

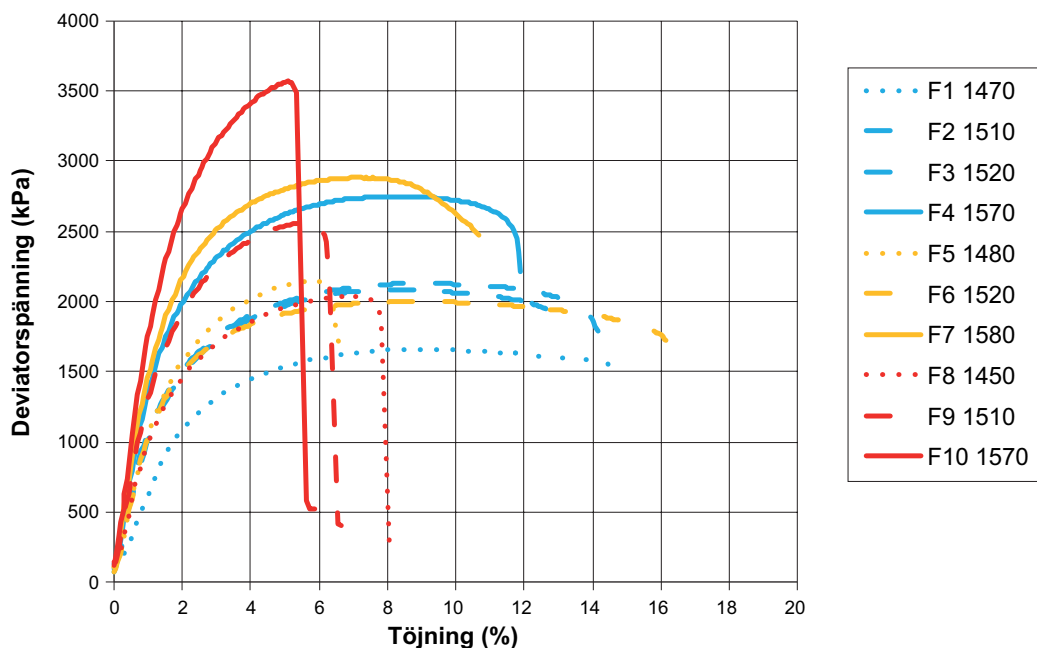
Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SSM såg positivt på att SKB har genomfört nya tester för att utreda inverkan av cementering på buffertens geomekaniska egenskaper. SSM ansåg att SKB bör utreda cementeringens beroende av den utsatta temperaturen och motivera den utvalda säkerhetsfunktionsindikatorn avseende maximal temperatur på 100 °C. Dessutom bör SKB studera om cementeringen även kan påverka buffertens geokemiska egenskaper.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2010

Studierna av faktorer som påverkar buffertens reologiska egenskaper fortsätter inom EU-projektet Pebs (Long-term Performance of Engineered Barrier Systems). Ett exempel på resultat finns i figur 25-23.

Det är uppenbart att provprepareringen har betydelse för resultatet från testerna.



Figur 25-23. Spännings-töjningsdiagram för MX-80. Den blå färgen representerar basmaterial. Den gula färgen visar tvättat material. Den röda färgen representerar finfraktionen (<2 millimeter) hos det tvättade materialet.

Program

Cementeringsstudierna fortsätter till slutet av Pebs. Syftet är att förbättra materialdatabasen för bufferten. Detta är av särskild vikt för beräkningar av skjuvlast på kapseln.

25.5.19 Kolloidfrigörelse/erosion

Upptaget av vatten och den resulterande svällningen av bentonitbufferten förhindras av deponeringshålets väggar och ett svälltryck utvecklas i bentoniten. Om sprickor skär deponeringshålet finns det inte några fasta hinder för svällning överallt. Lokalt fortsätter då svällningen in i sprickorna tills jämvikt eller stationära förhållanden uppnås. Denna fria svällning kan leda till att enskilda montmorillonitskikt separeras (dispergeras) och att en del av bufferten därigenom kan transporteras bort med grundvattnet. Den maximala fria svällningen av bentonit beror starkt på laddning och koncentration av jonerna i skikt mellanrummen. Vid för låga koncentrationer av lösta ämnen i grundvattnet, kan avståndet mellan de enskilda montmorillonitskikten öka så mycket att systemet lera/vatten får en kolloidal karaktär, det vill säga enskilda eller små grupper av montmorillonitskikt uppträder som enskilda kolloidala partiklar.

I SR-Site antogs att vatten med större katjoninnehåll än fyra millimolar laddningsekvivalenter kan förhindra uppkomsten av en dispersion, förutsatt att kalciuminnehållet i montmorilloniten är större än 20 procent, oberoende av montmorillonittyp.

Om porvattenkoncentrationen är lägre än 4 millimolar laddningsekvivalenter, kan partiklarna i gränssytan mellan bentonit och vatten svälla/diffundera in i det flödande vattnet och föras bort. Det finns även en region där gelen/dispersionen har en så låg partikelkoncentration att den bara är en aning mer viskös än vatten och därför kan flyta bort. En kraftbalansmodell för sfäriska kolloider har anpassats till parallella lerskikt och användes i SR-Site för att beräkna svällningen av natrium-montmorillonit in i sprickor fyllda med vatten med låg jonstyrka. Advektiv förlust av montmorillonit modelleras genom att kraftbalansmodellen för svällning kombineras med en viskositetsmodell för den repellerande montmorillonitgelen och Darcyekvationen för tvådimensionellt flöde i en spricka som skär deponeringshålet.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I granskningen av Fud-program 2010 var SSM positiva till att SKB hade tagit initiativ och satsat på det omfattande forskningsprojektet Bentonite Erosion. SSM ansåg att mycket betydelsefulla resultat har tagits fram inom projektet och att SKB:s förståelse av processen har blivit betydligt fördjupad.

SSM instämde med SKB att buffertens kemiska erosion är en viktig process i Kärnbränsleförvarets långsiktiga utveckling som har stor betydelse för förvarets långsiktiga säkerhet. Den är en av de två identifierade processer i SKB:s tidigare säkerhetsanalys SR-Can som kan leda till kapselbrott inom en miljon år (den andra är jordskalv). Med hänsyn till att erosionen kan påbörjas så tidigt som efter den första större glaciationen (som kan inträffa efter cirka 60 000 till 70 000 år) och kan äventyra integriteten av en teknisk barriär i ett flerbarriärssystem, ansåg SSM att det är viktigt att SKB har en tillräckligt djup förståelse av processen samt att välgrundade konsekvensanalyser kan formuleras för fallet med helt eller delvis eroderad buffert (Apted et al. 2010).

SKB bör eftersträva att modelleringar av buffertens kemiska erosion är internt konsistenta. Förekomsten av ännu inte klarlagda grundläggande skillnader, mellan såväl antaganden som resultat från olika modeller inom bufferterosiionsprojektet, kan komma att försvåra bedömningen av om förståelsen av processen är tillräckligt djup och om kvantifieringen av processen kan anses vara konservativ eller inte. SSM såg positivt på att SKB planerat att fortsättningsvis utreda olika aspekter av erosionsprocessen, såsom inverkan av kalcium, samt att genomföra fler mer noggrant kontrollerade försök. SSM ansåg att SKB vidare bör eftersträva en fortsatt utveckling av den matematiska modelleringen av kemisk erosion som avser mer realistiska system.

SKB bör också vidare studera inverkan av bufferterosion på andra säkerhetsfunktioner i barriärssystemet. Ett exempel på en särskilt viktig fråga är om vätgashalten kan upprätthållas på den nivå som krävs för att ha effekt på bränsleupplösning när bufferten eroderas.

Andra relaterade frågor som SSM bedömde vara intressanta är ifall:

- Kolloider som bildas direkt från aktinider (möjligen även från andra radionuklider) och som inte filteras kan transporteras snabbare ut ur Kärnbränsleförvaret och därmed påverka radionuklidtransportberäkningarna.
- Mikrobiella processer som sker intill kapseln eller direkt på kapselns yta kan ha stor betydelse för allmän korrosion (Apted et al. 2010).
- Bortförel av uran sorberad på kolloidpartiklar kan påverka bränsleupplösningen.

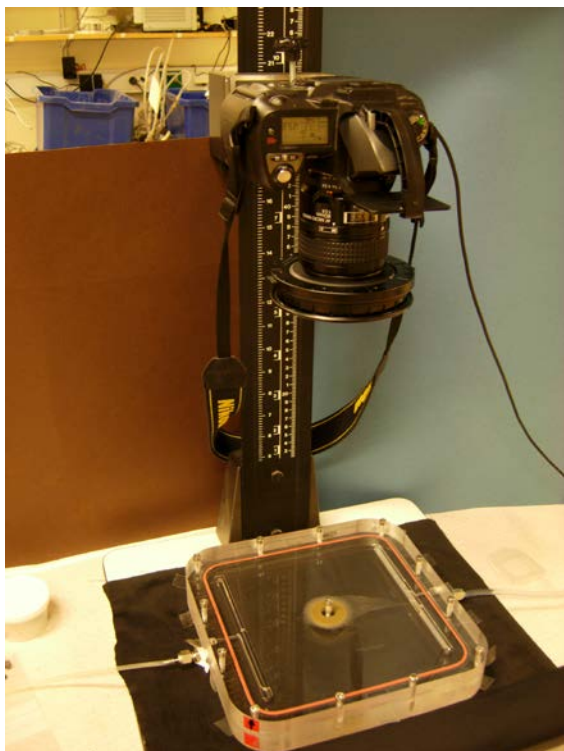
Ny vunnen kunskap sedan Fud 2010

Ett fokusområde för erosionsprogrammet den senaste perioden har varit att studera erosion i en konstgjord spricka, i stället för i rör eller genom filter vilket var fallet i det tidigare programmet. Denna typ av experiment genomförs av flera laboratorier inom ramen för EU-projektet Belbar (Bentonite Erosion: effects on the Long term performance of the engineered Barrier and Radionuclide transport). Ett exempel på en försöksupställning finns i figur 25-24.

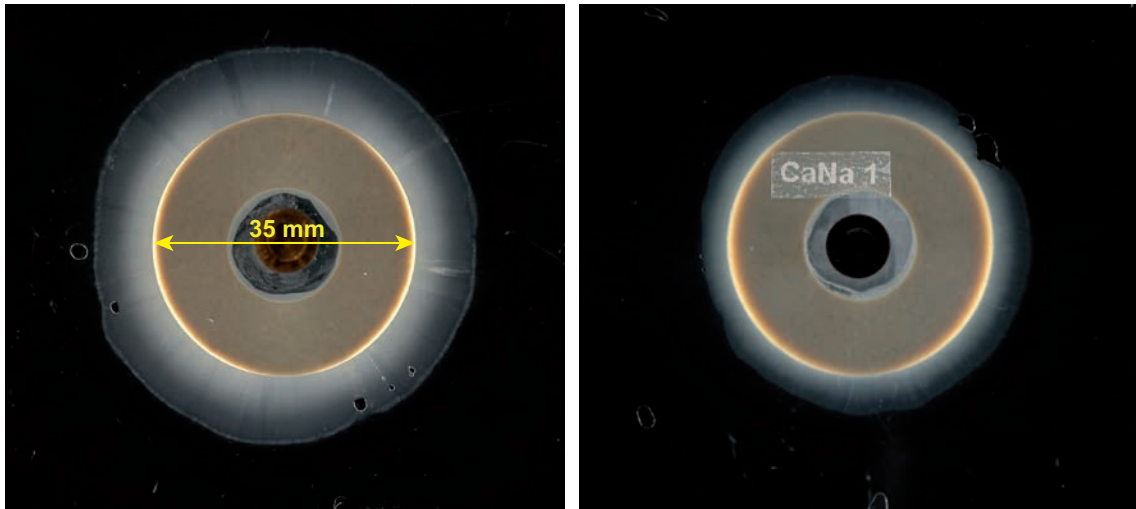
I den här typen av experiment kan både utsvällning och erosion studeras. De parametrar som ingår är desamma som de som användes i erosionsmodellen för ett deponeringshål i SR-Site (Moreno et al. 2010). Figur 25-25 visar resultat från ett utsvällningsförsök utan vattenflöde.

I båda lerorna kan man se tre olika svällningsregioner: en vit region närmast blocket med hög densitet och viskositet, en genomskinlig grå region och ett yttre region med vita fransar. Utsvällningen är dock betydligt större för den rena natrium-montmorilloniten.

Ren kalcium-montmorillonit bildar inte kolloider, inte ens i destillerat vatten. En studie har därför genomförts för att utreda hur mycket natrium som kan jonbytas in i leran, utan att den egenskapen förändras (Hedström et al. 2011). En viktig slutsats är att det behövs så mycket som att cirka 90 procent av jonbyteskapaciteten är ockuperad av kalcium för att leran ska uppföra sig som en kalcium-montmorillonit i det här avseendet. Studien visade också att ren kalcium-montmorillonit inte eroderar genom ett 100-mikrometerfilter, medan en 80/20 kalcium/natrium-montmorillonit lätt tar sig igenom ett 2-mikrometerfilter.



Figur 25-24. Försöksupställning för ett försök med konstgjorda sprickor.



Figur 25-25. Utsvällning av bentonit i en 0,1 millimeter konstgjord spricka med destillerat vatten. Den vänstra bilden visar en ren natrium-montmorillonit medan den högra visar en 50/50 natrium/kalcium-montmorillonit.

Modellen som används för att beräkna erosionen är relativt komplicerad. Lösningen kan medföra numeriska problem, på grund av ömsesidig påverkan av tre faktorer: utvecklingen av kemin i gel/solsystemet, de krafter som påverkar smektitpartiklarna och viskositeten av gel/solen som avgör hur den kan flyta. Därför har det utretts vilka mekanismer som har en dominerande inverkan på erosionen och hur förenklingar skulle kunna göras för att få mer transparenta, snabbare och stabilare beräkningar. Det har visat sig att vattenkemin har en avgörande betydelse i området där gel/solen möter det strömmade vattnet och det är därför möjligt att frikoppla utvecklingen av kemin från svällningen i modellen och därigenom förenkla lösningen.

Program

Frågeställningarna studeras inom EU-projektet Belbar och i separata SKB-projekt.

Inom SKB:s regi kommer ett omfattande experimentprogram att fortsätta. Huvudinslagen i programmet är följande:

- Produktion av rena natrium- och kalcium-smektiter baserat på fyra bentonitmaterial med varierande flakladdning och laddningsfördelning.
- Erosionsförsök av natrium- respektive kalcium-montmorilloniter i artificiell spricka.
- Förbättra förståelsen för homogeniseringsprocessen i samband med kraftig erosion. Till vilken grad kommer leran att kunna homogenisera? Dessa försök kommer att göras i tryckceller.
- Bestämning av fasdiagram för natrium- respektive natrium/kalcium-montmorilloniter.
- Reologiska tester av blandade natrium/kalcium-montmorilloniter med givna natrium/kalcium-förhållanden.
- Utveckla den teoretiska förståelsen och försöka relatera teoretiska koncept till de experimentella observationerna.

Syftet är att få ökad processförståelse, vilket i sin tur kan leda till en bättre förmåga att kvantifiera eventuell förlust av bentonit.

Modellen som användes för buffertförlust i SR-Site kommer att vidareutvecklas. Det är viktigt att få en ökad förståelse för hur en helt eller delvis kalciumjonbytt bentonit eroderar. Målet är att undersöka de eventuella effekterna av hur olika mekanismer och faktorer påverkar kolloidstabilitet av dispersioner av kalciumdominerad bentonit i utspädda lösningar, såsom korrelationer av joner, skillnad i storlek av små joner och heterogenitet av ytladdningar och så vidare. Resultaten kommer att användas för att förklara varför kalciumdominerad bentonit fungerar helt annorlunda jämfört med natriumbentonit.

Inom Belbar pågår också omfattande forskning kring bentoniterosion som drivs av andra organisationer än SKB. Detta gör att projektet kan fungera som ett vetenskapligt diskussionsforum där frågeställningar kan genomlysas och granskas på ett effektivare sätt än om frågan drevs av en enskild organisation.

25.5.20 Strålinducerad montmorillonitombildning

Montmorillonit i bufferten kan brytas ned av joniserande strålning. Resultatet blir i så fall en minskning av montmorillonithalten och en förändring av bentonitens egenskaper. Innan kapselbrott är det bara gammastrålning som kan påverka bufferten. I ett fall med en skadad kapsel där radionuklider kommer ut är det även möjligt att bufferten utsätts för alfastrålning. I projektet SR-Site baseras hanteringen på en studie av Pusch et al. (1993) för fallet med gammastrålning. Där utsattes kompakterad MX-80-bentonit för en total gammados av 30 megagray, vilket är flera storleksordningar mer än vad som kommer att vara fallet i förvaret. Mineralogiska studier visade försumbara skillnader jämfört med prov som inte utsatts för strålning. Gu et al. (2001) visade att amorfiseringsdosen för montmorillonit för alfastrålning är 30 gigagray. Beräkningar har visat att den totala dosen från sorberade alfastrålare i bentoniten närmast kapseln vid en tidig kapselskada är $8 \cdot 10^{15}$ alfa per gram bentonit. Detta motsvarar en dos på åtta megagray, vilket är flera storleksordningar lägre än amorfiseringsdosen.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SSM ansåg i sin granskning av Fud-program 2010 att SKB bättre bör redovisa frågan om strålinducerad montmorillonitombildning. (I Fud-program 2010 har inga referenser citerats, vilket försvårade SSM:s bedömning.)

Dessutom ansåg SSM att SKB bör ta hänsyn till synpunkter från Kungliga vetenskapsakademien, KTH och Milkas (Hultén) om strålningens effekter på bentonit/vatten samt osäkerheter i samband med dosuppskattningen.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Ingen ny verksamhet sedan Fud-program 2010 har genomförts. Det som efterfrågades vid granskningen av Fud-program 2010 var kunskap som fanns, men där referenserna behövde beskrivas bättre.

Program

Inga ytterligare studier planeras inom området radiolys av porvatten.

25.5.21 Mikrobiella processer

Mikrobiella processer kan under vissa betingelser ge upphov till bildning av gaser och sulfid. Gasbildning skulle kunna ge mekaniska laster i förvaret, medan sulfid skulle kunna korrodera kopparkapseln. Eftersom mikrobiell bildning av sulfid primärt är av betydelse för kapselns egenskaper hanteras den i avsnitt 24.2.8 Korrosion kopparkapsel.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Processen påverkar främst kapseln och redovisas därför i kapitel 24.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Processen påverkar främst kapseln och redovisas därför i kapitel 24.

Program

En anledning till att metalliskt järn kan omvandla montmorillonit antas vara för att det kan fungera som ett reduktionsmedel av montmorillonitens strukturella järn(III). En förändring i järnets oxidationstal förväntas medföra en förändring i montmorillonitens flakladdning och därmed också dess egenskaper och potentiellt dess förmåga att omvandlas till ett icke-svällande lermineral.

I naturen finns mikrober som i en del av sin ämnesomsättning kan reducera trevärt järn, så kallade järnreducerande bakterier (IRB). Förekomsten av IRB i olika bentoniter har undersökts i ABM-experimentet (Svensson et al. 2011). De har också studerats vid brytningen av den yttre sektionen av Prototypförvaret, där de sporadiskt har iakttagits, speciellt nära kontakten mot berget (rapporterat 2013). Det finns indikationer på att dessa mikrober i vissa fall kan reducera det strukturella järnet i montmorillonit och därmed också öka sannolikheten för illitisering (Kim et al. 2004). Ett experimentellt program rekommenderas för att utreda under vilka betingelser som denna omvandling kan ske och framför allt, om det i så fall även kan ske i kompakterad bentonit.

Ett annat potentiellt fenomen som studeras är mikrobers aktivitet i ett ”vattenmättnadsfönster”. Aktiviteten av mikrober i en kompakterad vattenmättad bentonit är mycket låg och detsamma gäller i en bentonit med låg vattenmättnadsgrad. Teoretiskt skulle det dock kunna finnas ett ”fönster” i vattenmättnad, där vatteninnehållet är tillräckligt högt för att gynna mikroberna, men svälltrycket för lågt för att hämma dem. Sulfatreducerande bakteriers överlevnad och aktivitet studeras i bentonitprov som vattenmättats och jämviktats vid olika vattenaktivitet. För de nu aktuella försöken planeras två försökstyper, en med konstant vattenaktivitet/tryck i varje enskilt prov samt en med en gradient i vattenaktivitet/tryck genom de enskilda försöken. Jämviktningen av de senare planeras ske via en extern gasfas, där vattenaktiviteten kontrolleras med hjälp av saltlösningar på provens respektive sidor.

25.5.22 Radionuklidtransport i bufferten

Transportmotståndet mellan det stillastående vattnet i bufferten och den begränsande arean på sprickorna i berget är en viktig barriärfunktion i KBS-3-konceptet.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

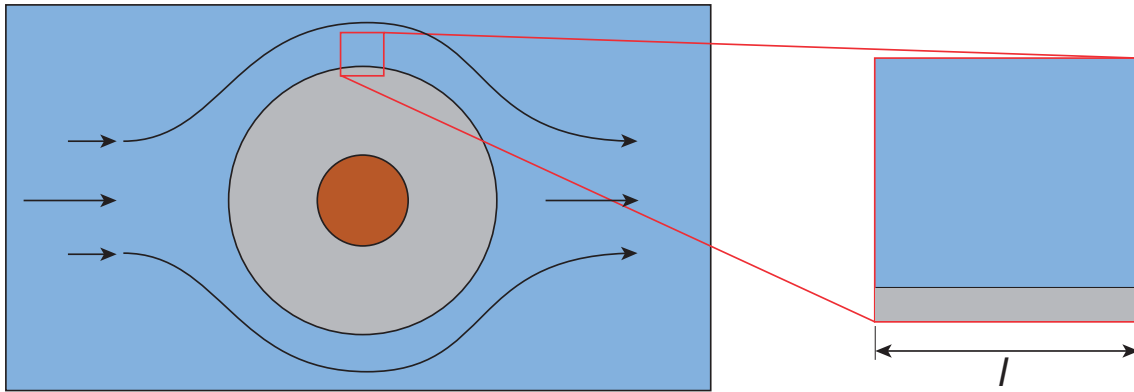
Inga direkta synpunkter framkom i granskningen av Fud-program 2010.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

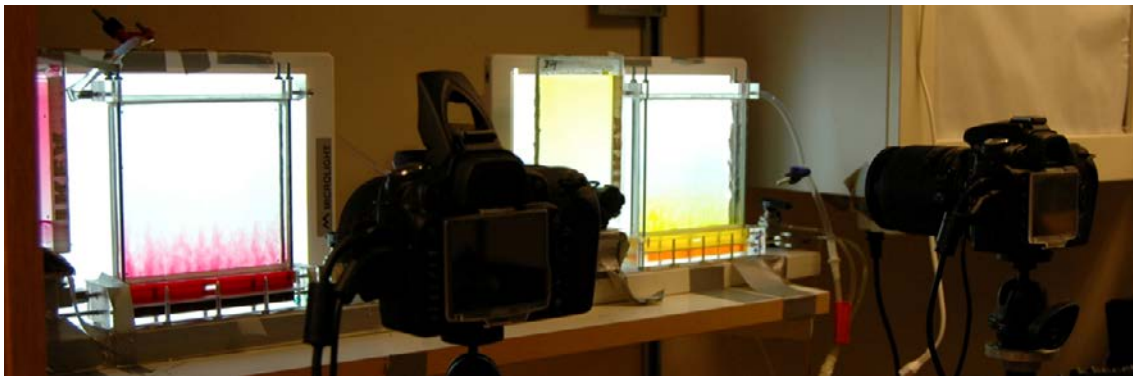
Med målet att experimentellt verifiera och visualisera Q-ekvivalentmodellen, har detta projekt fokuserat på masstransporten av radioaktivt material, från bentonitleran in i grundvatten flödande i bergets sprickor, se figur 25-26. Detta har genomförts genom att först visuellt bestämma aperturen i en transparent artificiell bergsspricka och sedan mäta koncentrationen av ett ljusabsorberande ämne som tillåtits diffundera in i sprickan med bestämda intervall, se figur 25-27. Vidare experiment ämnar koppla diffusionen i sprickan med ett pålagt perpendikulärt flöde.

Program

Projektet med att verifiera modellen för transport mellan det stillastående vattnet och bufferten och det strömmande vattnet i en spricka kommer att fortsätta. Tanken är att göra experiment i relativt liten skala för att snabbt kunna producera resultat och göra parametervariationer.



Figur 25-26. Princip för Q-ekvivalentmodellen.



Figur 25-27. Mätning av diffusion in i en konstgjord spricka.

26 Geosfär

26.1 Initialtillstånd för geosfären

I enlighet med diskussionen i SR-Site avsnitt 5.1 definieras initialtillståndet för geosfären som det naturliga ostörda tillståndet vid tidpunkten då bergguttaget för förvaret inleds. Det innebär att även kortvariga processer eller förändringar i geosfären, orsakade av bergguttaget och drift av förvaret, behöver beaktas. Det primära underlaget för att kunna bestämma detta initialtillstånd utgörs av resultaten från platsundersökningarna (det vill säga platsbeskrivningen och dess modeller, se till exempel Andersson et al. (2013)), monitoringsprogrammet (SKB 2007a), detaljundersökningarna (se avsnitt 14.4 Detaljundersökningar) och bergarbetena (se avsnitt 14.5 Utförandemetod och byggnadsmaterial).

Generellt gäller att de förhållanden i berget som är fördelaktiga för den långsiktiga säkerheten också innebär god byggbarhet och säker arbetsmiljö. En god byggbarhet och en stabil berganläggning är dessutom fördelaktigt under anläggningens drift. De krav och förutsättningar som gäller för bergutrymmena beskrivs i programmet för teknikutveckling berg, se kapitel 14.

Initialtillståndet för geosfären är främst beskrivet med platsmodellen (SDM). Dess beskrivning (SKB 2011e, sammanfattning i kapitel 4) förfinas delvis med hjälp av de metoder som beskrivs i avsnitt 14.4 Detaljundersökningar, vilket behandlar detaljundersökningsprogrammet och den vidareutveckling av metoder som planeras för kartering och mätning av bergets termiska, mekaniska och hydrauliska egenskaper. Bergets initiala transportegenskaper och hydrogeokemiska tillstånd utgör också en del av initialtillståndet. Dessa initiala egenskaper och tillstånd förändras med tiden genom de processer som beskrivs nedan.

26.2 Översikt av processer i geosfären

Värme som alstras i bränslet leds ut via kapseln och bufferten och värmer upp det omgivande berget. Genom grundvattenströmning omfördelas grundvattnet i geosfärens spricksystem. Även gasmigration kan förekomma. I geosfären råder initialt ett mekaniskt tillstånd som bestäms av de naturliga bergspänningarna och spricksystemen på förvarsplatsen, samt av de förändringar som konstruktionen av förvaret givit upphov till.

Den mekaniska utvecklingen bestäms av hur geosfären svarar på de olika mekaniska laster den utsätts för. Lasterna kan utgöras av den termiska expansion som uppvärmningen av förvaret leder till, trycket från svällande buffert och återfyllning, effekter av jordskalv och den storskaliga tektoniska utvecklingen. Förändringarna i geosfären kan förekomma i form av sprickbildning, reaktivering (upprepade rörelser i befintliga sprickor) eller krypning i berg (långsamma omlagringar i berget). Dessutom förekommer rörelser i intakt berg, det vill säga kompression eller expansion av i övrigt intakta bergblock samt erosion, det vill säga vittring av ytberget, framför allt i samband med istider.

Den kemiska utvecklingen efter förslutning bestäms av en rad transportprocesser och reaktioner. Vattenlösta ämnen följer med det strömmande vattnet genom advektion. Processen leder bland annat till att olika vattentyper från olika partier av geosfären blandas. Reaktioner sker mellan grundvattnet och sprickytor, vilket ger upphov till upplösning och utfällning av sprickmineral. Dessutom sker mycket långsamma reaktioner mellan grundvatten och mineral i bergmatrisen. I grundvattnet sker mikrobiella processer, nedbrytning av oorganiska material från förvarskonstruktionen, kolloidbildning och gasbildning. Vid en glaciation kan också metanisbildning och saltutfrysning förekomma.

Diffusion kan vara betydelsefull om vattnet är stillastående eller rör sig mycket långsamt. En viktig aspekt av detta är matrisdiffusion, det vill säga att radionuklider diffunderar in i det stagnanta vattnet i bergets mikrosprickor och på så sätt undandras och transporteras långsammare än det flödande vattnet. Avgörande för radionuklidtransporten är även sorption, det vill säga det faktum att radionuklider kan sorbera (fastna) på spricksystemets och bergmatrisens ytor. Matrisdiffusion och sorption är de två viktigaste retentionsprocesserna för radionuklider i geosfären. En annan faktor som kan ha betydelse för retentionen är sorption på kolloidala partiklar och transport med dessa.

Den kemiska miljön i vattnet bestämmer vilken speciering (kemisk form) radionukliderna kommer att ha, vilket är avgörande speciellt för sorptionsfenomenen. Vissa nuklider kan transporteras i gasfas. Det radioaktiva sönderfallet påverkar innehållet av radionuklider i grundvattnet och måste därför inkluderas i beskrivningen av transportfenomenen.

I de följande avsnitten behandlas forskningsprogrammet om olika processer i geosfären som kan inverka på den långsiktiga säkerheten. När det gäller de mekaniska processerna är de i verkligheten starkt kopplade till varandra, varför det i de nedanstående delkapitlen är svårt att renodla redovisningarna. Den utveckling som sker inom modellering, där processer hanteras integrerat, presenteras i slutet av kapitlet.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 redovisade SKB en översikt av de processer som påverkar Kärnbränsleförvarets barriärer och grundvattentransporten av ämnen till och från slutförvarets närområde. För en närmare redovisning av programmet kopplat till dessa processer, hänvisade SKB till de efterföljande kapitlen i Fud-program 2010.

SSM saknade en redovisning över hur urvalet av processerna i detta avsnitt kopplade till tabell 17-1 i Fud-program 2010 (sidan 196), där en översikt av processerna samt storleken av planerade insatser redovisades. SSM noterade att det saknades hänvisningar till forskningen kring erosionsrelaterade processer som beskrivs i klimatavsnittet.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

Se respektive process i avsnitt 26.3–26.23.

Program

Se respektive process i avsnitt 26.3–26.23.

26.3 Värmetransport

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 redovisades principerna för de termiska modelleringarna av platserna Forsmark och Laxemar. Den rumsliga variationen och uppskalning till relevanta modelleringsskalor kopplades till de geologiska platsmodellerna och analyserades med geostatistiska metoder (Sundberg et al. 2008).

Vidare presenterades det fortsatta arbetet med att kvantifiera och begränsa osäkerheter i temperaturberäkningar, liksom utvecklingen av såväl fält- som laboratoriemetoder för bestämning av termiska egenskaper. I fokus var metoder för bestämningar av kapselavstånden i deponeringstunnlar, vilka bland annat är beroende av de termiska förhållandena. Detta innebär att man kan ta hänsyn till fördelning och rumslig korrelation av värmeledningsegenskaper i dimensioneringsberäkningarna som ligger till grund för kapselavstånden i de olika bergdomänerna för en viss layout (Hökmark et al. 2009). En viktig del i dimensioneringsberäkningar är att bestämma en tillräcklig, men inte överdriven, osäkerhetsmarginal.

I den så kallade THM-rapporten för geosfären (Hökmark et al. 2010), som även utgjorde underlag till SR-Site, analyserades konsekvenserna i termer av antal påverkade kapslar, om den totala osäkerhetsmarginalen i dimensioneringsberäkningarna av någon anledning skulle visa sig vara otillräcklig.

I Fud-program 2010 kommenterades även att temperaturdata i borrhål från Laxemar och Forsmark har använts för att bestämma temperaturen på förvarsdjup och för att bekräfta vattenströmning från hydrauliska mätmetoder. Temperaturfördelningen innehåller emellertid mer information. Med den rumsliga variationen av värmeledningsförmågan i större skala kan spår av historiska klimatförändringar analyseras (Sundberg et al. 2009).

SSM ansåg i sin granskning att SKB bör vidareutveckla fältmetoder för att på ett effektivt sätt kunna verifiera bergets termiska egenskaper.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Utvecklingsarbetet om mätning av termiska egenskaper har huvudsakligen bedrivits inom ramen för detaljundersökningsprogrammet, se avsnitt 14.4.

Viss modellutveckling om termiska processer har skett inom ramen för analys av Prototypförvaret i Äspölaboratoriet (se avsnitt 13.1.2 Återfyllning och plugg). Den viktigaste slutsatsen är att den termiska utvecklingen kan beskrivas väl med den metodik som också använts vid prediktering av den termiska utvecklingen i Forsmark. Denna metodik baseras på de termiska samband som finns inbyggda i den distinkta elementkoden 3DEC. Den innebär att de cylindriska kapslarna representeras med speciellt utvecklade kombinationer av linjekällor, att berget antas ha homogena värmetransportegenskaper och att man kan bortse från inverkan av att tunnelåterfyllningen och bentonitbufferten har andra värmetransportegenskaper än berget.

Med denna metodik och med värmeledningstal som är i överensstämmelse med värden (Sundberg et al. 2005) som räknats fram med hjälp av laboratoriebestämningar, utförda på prover från bergmassan i Prototypförvaret, reproduceras temperaturutvecklingen i samtliga mätpunkter i experimentets yttre sektion med ett fel som är mindre än två grader. I den inre sektionen ger beräkningarna en systematisk överskattning av temperaturen med 2–4 grader, men först efter att dränering av försöket påbörjats cirka 1 000 dagar efter att uppvärmningen började. Förklaringen, eller en del av förklaringen, till avvikelserna är antagligen kylningen av den inre sektionen som dräneringen har medfört. Värmetransporten i den yttre sektionen, där dräneringen varit väsentligt mindre, förefaller däremot att vara mycket väl beskriven med den metodik som tillämpats också för Kärnbränsleförvaret i Forsmark.

Program

Utvecklingsarbetet som rör mätning av termiska egenskaper kommer huvudsakligen att ske inom detaljundersökningsprogrammets andra fas, se avsnitt 14.4 Detaljundersökningar. För att vidareutveckla analysen av termisk last behöver det dessutom klargöras med vilken noggrannhet resteffekten kan bestämmas, se avsnitt 11.7 Resteffekt. Övriga insatser med bäring på termiska processer och värmetransport hanteras inom ramen för tänkbara klimatologiska scenarier, se kapitel 19 Klimatutveckling.

26.4 Grundvattenströmning

Jämfört med tidigare års Fud-program har kapitlet Grundvattenströmning i årets program en något annan utformning. Texten delas upp i fem olika underavsnitt. Dessa är Yhydrologi och ytnära hydrogeologi, Hydrogeologi i det djupa berget, Specifika frågeställningar kopplade till Kärnbränsleförvaret, Specifika frågeställningar kopplade till SFR och SFL samt en beskrivning av det internationella samarbetet inom SKB Task Force on modelling of groundwater flow and transport of solutes. Inom varje underavsnitt beskrivs i sedvanlig ordning slutsatser i Fud-program 2010 och dess granskning, resultat som uppnåtts sedan föregående Fud-program samt program för den kommande Fud-perioden. Den nya strukturen är tänkt att underlätta för läsaren genom att en klarare struktur på innehållet uppnås. Vidare blir kopplingar och referenser till andra kapitel i Fud-programmet tydligare. Det bör även noteras att i den nya strukturen behandlas frågor om initialtillståndet för grundvattenströmning i föreliggande och nästa (Gasströmning/gaslösning) avsnitt och alltså inte i avsnitt 26.1 som i tidigare Fud-program.

Vidare har en förändring genomförts i uppdelningen av yhydrologiska processer med avseende på vad som beskrivs i detta kapitel och vad som beskrivs i avsnitten för biosfären/ytsystemet. Modelleringen av vattenströmning och ämnestransport i systemets översta del, (vanligen benämnd ytsystemet, ytnära ekosystem eller biosfären) innefattar flöde och transport i ytnära grundvatten och olika former av ytvatten på markytan, samt interaktioner mellan ytvatten och grundvatten och mellan vatten på och nära markytan och atmosfären. De frågeställningar som undersöks är i första hand kopplade till säkerhetsanalysens modelleringar av radionuklidtransport i ytnära ekosystem och associerade stråldoser till människa och miljö (långsiktiga konsekvenser). Dessutom behövs underlag till miljökonsekvensbeskrivningens analyser av förvarets hydrologiska påverkan och dess konsekvenser under den jämförelsevis korta inledande bygg- och driftperioden.

Behovet av att integrera modellbeskrivningar och det faktum att samordning av modelleringsinsatser har kommit allt mer i fokus när den senaste generationen platsbeskrivande modeller och säkerhetsanalysmodeller tagits fram, gör att detta Fud-program i större utsträckning än tidigare samredovisar utvecklingsinsatser för berg och ytsystem. Det mesta som rör vattenflöde och icke-reaktiv transport i ytnära grundvatten och ytvatten redovisas därför i detta avsnitt. I kapitel 27 Ytnära ekosystem begränsas beskrivningarna av flöde och transport i huvudsak till lärdomar och utvecklingsinsatser med direkt koppling till biosfärsobjekt och tillhörande modellering av radionuklidtransport och doser, se avsnitt 27.6 Hydrologi och transport. Retention och reaktiv transport av radionuklider i jordlagren behandlas också i kapitlet om Ytnära ekosystem, se avsnitt 27.5 Biogeokemi och 27.6 Hydrologi och transport.

26.4.1 Yhydrologi och ytnära hydrogeologi

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Generellt konstaterade SSM i sin granskning av Fud-program 2010 att de instämmer i SKB:s syn att hydro- och transportmodellering i ytnära system är viktiga komponenter för att ge processförståelse om spridning av radionuklider i ytmiljön och ge input till säkerhetsanalysens biosfärtransportmodeller. SSM var vidare positiv till att SKB har förbättrat kopplingarna mellan hydromodellerna, de processbaserade transportmodellerna och biosfärtransportmodellerna.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

I likhet med de närmast föregående programperioderna, har utvecklingen av förståelse, konceptuella modeller och numeriska modeller sedan Fud-program 2010 främst bedrivits inom ramen för projekt som syftade till att ta fram underlag för ansökan om att få bygga och driva Kärnbränsleförvaret. När det gäller yhydrologi och ytnära hydrogeologi redovisas de yhydrologiska modelleringar av Forsmark som utfördes inom säkerhetsanalysen SR-Site av Bosson et al. (2010). För att ta fram underlag för jämförelser mellan platserna genomfördes också yhydrologisk modellering av Laxemar och Simpevarp; denna betydligt mindre modelleringsinsats presenteras av Sassner et al. (2011). Samtliga yhydrologiska modelleringar utfördes med modelleringsverktyget Mike She, som innehåller beräkningsrutiner för bland annat mättad och omättad grundvattenströmning, ytvattenströmning på markytan och i vattendrag, avdunstningsprocesser och vegetationens inverkan på hydrologin. Dock kan densitetsdriven strömning inte simuleras med detta verktyg.

Betydande utvecklingsinsatser har gjorts inom modelleringen av framtida hydrologi, där omfattande yhydrologisk modellering av Forsmark gjordes för SR-Site i syfte att förbättra processförståelse och underlaget för transportmodellering. Betydelsen av olika processer och förhållanden för vattenbalanser och andra övergripande hydrologiska karakteristika undersöktes med hjälp av en serie beräkningsfall. Dessa innefattade olika strandlinjelägen, som representerade olika tidpunkter från nutid till 10 000 år efter Kristus, klimatfall som representerade dagens klimat, framtida klimat med högre temperatur och mer nederbörd, och kallare klimat med permafrost, samt olika varianter av jordlagermodeller och vegetationsbeskrivningar. Resultaten visar på betydelsen av klimatförhållandena, jämfört med andra variabler för områdets hydrologi i stort. Dessa modeller och modellresultat har analyserats vidare och publicerats i form av artiklar i vetenskapliga tidskrifter (Bosson et al. 2012a, Berglund et al. 2013a).

Beskrivningen av periglaciala system med permafrost till relativt stora djup i berget har varit föremål för särskilt intresse under den gångna programperioden. Som en del av SR-Site gjordes Mike She-modelleringar av ett tänkt framtida periglacialt system i Forsmark. Närvaron av permafrost representerades där genom att berg och jordlager tilldelades mycket låga vattengenomsläppligheter och dynamiken i det aktiva lagret under året simulerades i form av en tidsserie där den översta biten av markprofilen antingen var frusen, ofrusen eller under förändring mellan dessa tillstånd.

Modelleringarna fokuserade i stor utsträckning på talikar, det vill säga ofrusna partier som kan uppstå under större sjöar och som kan fungera som flödes- och transportvägar från förvarsdjup till ytan. Transportvägar i och mellan inströmnings- och utströmningstalikar inom modellområdet och flöden i olika typer av talikar beräknades (Bosson et al. 2010). Som förväntat, visar resultaten att

stora förändringar sker i flödesmönstret när klimatet har förändrats så mycket att permafrost etableras. Även i detta fall har det gjorts fördjupade analyser som resulterat i vetenskaplig publicering (Bosson et al. 2012b).

Periglacial hydrologi är också temat för ett doktorandarbete vid Stockholms universitet som pågått sedan 2010. Detta doktorandarbete bedrivs inom projektet Grasp (Greenland Analogue Surface Project). Fältmätningar görs inom ett avrinningsområde karakteriserat av periglaciala förhållanden, ett mäktigt permafrostlager och en förmodad talik i Kangerlussuaq på Grönland. Detta är samma område som används inom GAP, se avsnitt 19.7 Greenland Analogue Project (GAP). Forskningen har hittills till stor del varit inriktad på att etablera mätstationer och samla in data, men även vissa inledande modelleringar har genomförts. Under 2012 har två publikationer (Bosson et al. 2012a, b) kommit ut inom ramen för doktorandprojektet.

Inom säkerhetsanalysen SR-Site har ythydrologisk modellering också använts för att närmare studera flöde och vattenburen transport till och inom utvalda biosfärsobjekt och för att generera indata till biosfärsmodelleringens transport- och dosberäkningsmodell. Dessa aktiviteter beskrivs i avsnitt 27.6 Hydrologi och transport. Där beskrivs även forskning och utveckling inom modellering av reaktiv transport, det vill säga modeller som kombinerar transport med strömmande vatten och processer som medverkar till att de transporterade ämnena omvandlas och/eller fördröjs.

Ovan beskrivna aktiviteter är alla relaterade till värderingen av långsiktiga konsekvenser av eventuell radionuklidtransport från ett förvar efter avslutad deponering. Mike She har också använts för modellering av påverkan på grundvattennivåerna under det inledande bygg- och driftskedet. Under denna period står förvaret öppet och inläckage av grundvatten till tunnarna kan komma att påverka grundvatten nära markytan och olika former av ytvatten. Denna påverkan, som primärt består i avsänkningar av grundvattenytan, kan i sin tur medföra negativa konsekvenser för ekosystem och skyddsvärda naturobjekt.

En viktig utveckling som nu har avrapporterats är själva metodiken för hur modelleringen av förvarets hydrologiska påverkan kombineras med identifiering och klassificering av naturobjekt i konsekvensbedömningen. Sammanfattande rapporter som beskriver metodik och genomförande har publicerats av SKB, se Werner et al. (2010a) avseende Forsmark och Werner et al. (2010b) avseende Laxemar-Simpevarp. Arbetet har även presenterats i form av vetenskapliga artiklar (Werner et al. 2011, 2013). Den hydrologiska modelleringen, som bland annat inbegriper en vidareutveckling av kopplingen mellan grundvattenmodellen i Mike She och den beräkningsrutin som hanterar inflödet i tunnarna, beskrivs av Mårtensson och Gustafsson (2010). Detaljerade modelleringar av specifika naturobjekt (gölar och våtmarker), inklusive analyser av åtgärder i form av vattentillförsel, presenteras av Mårtensson et al. (2010).

Samtliga hittills beskrivna utvecklingsinsatser som behandlar Forsmark har genomförts inom eller i direkt anslutning till SKB:s arbete med att ta fram ansökningar om byggande och drift av Kärnbränsleförvaret. Data från SKB:s platsundersökningar och monitoringsprogram har emellertid också använts inom vetenskaplig forskning som undersöker mer generella hydrologiska frågeställningar. SKB:s undersökningsområde i Forsmark saknar större vattendrag och utgör därmed ett exempel på en typ av område som vanligtvis inte brukar vara föremål för omfattande insamling av hydrologiska data, exempelvis ytvattenflöden. Resultaten från den generella vetenskapliga forskningen kommer direkt SKB till del och stärker vår kunskapsbas om Forsmark.

Meteorologiska och hydrologiska data från Forsmark har använts för att kvantifiera betydelsen av sådana områden för ämnestransporten till Östersjön. Dessa data har också använts i jämförelser mellan olika typer av avrinningsområden och för att undersöka effekterna av nedbrytnings- och fördröjningsprocesser längs olika transportvägar i områden av den typ som Forsmark representerar. Detta har resulterat i ett antal vetenskapliga publikationer producerade vid Stockholms universitet, exempelvis tidskriftsartiklar av Darracq et al. (2010), Destouni et al. (2010) och Persson et al. (2011b) och en doktorsavhandling (Persson 2011). Tidsseriedata från Forsmark har också använts som en del av underlaget för en licentiat- respektive doktorsavhandling vid KTH (Juston 2010, 2012).

Program

Den största insatsen inom ythydrologi kommer att bedrivas genom det ovan beskrivna doktorandprojektet inom ythydrologi med koppling till periglaciala förhållanden. Kunskapen om hydrologiska processer i periglaciala områden är bristfällig och en ökad konceptuell förståelse för hydrologi och yt nära hydrogeologi i en miljö dominerad av permafrost behövs för att kunna beskriva de förhållanden som kan komma att råda i Forsmark i framtiden. Hydrologin utgör en viktig del inom projektet Grasp då transport av ämnen inom och mellan olika ekosystem till stor del påverkas av vattenflödena i området. Sålunda drivs som en del av Grasp ett doktorandprojekt om just hydrologiska processer under periglaciala klimatförhållanden. Hydrologiska undersökningar pågår sedan hösten 2010 och kommer att fortsätta även under de närmast kommande åren.

Denna hydrologiska del syftar till att öka förståelsen av vattenflödena inom och mellan olika hydrologiska domäner i ett landskap dominerat av permafrost. Projektet fokuserar på att öka kunskapen om de hydrologiska processerna i det aktiva lagret, det vill säga det översta marklagret som varje sommar tinar ovanpå permafrosten och där hydrologisk aktivitet kan ske under sommarhalvåret. Kunskapen om talikars roll för den övergripande vattenbalansen i ett periglacialt system är också en av huvudfrågorna i projektet. Talikar, som kan förekomma under sjöar och vattendrag i ett periglacialt landskap, är ofrusna delar av berget och marken där således interaktion mellan djupt och ytligt grundvatten möjliggörs.

Sjön i det undersökta området på Grönland, Kangerlussuaq, är en talik, enligt nuvarande indikationer från mätningar. Installation av en väderstation i avrinningsområdet genererar detaljerad information om den lokala nederbörden och avdunstningen. Den meteorologiska informationen i kombination med mätningar av vattentryck, markvattenhalt och marktemperatur utgör en viktig grund för beräkning och konceptuell förståelse av områdets vattenbalans.

Befintliga konceptuella och numeriska hydrologiska modeller för Forsmark används i projektet och utgör basen för att utveckla motsvarande modeller för periglaciala klimatförhållanden. De hydrologiska modellerna som kommer utvecklas planeras enbart att behandla permafrostförhållanden utan närvaro av inlandsis.

Fortsatt modellutveckling kommer att ske inom ramen för det pågående säkerhetsanalysprojektet SR-PSU för utbyggnaden av SFR. Denna utveckling rapporteras dock inom projektet och inte i detta Fud-program. Övriga aktiviteter inkluderar främst mindre kodutvecklingsinsatser avseende Mike She. Möjligheten att inkludera simulering av grundvattenkemi i Mike She ska undersökas.

26.4.2 Hydrogeologi i det djupa berget

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SSM ansåg att SKB:s program under kapitel grundvattenströmning generellt sett var ändamålsenligt och gav en översiktlig bild av de frågeställningar som SKB anser behövs belysas ytterligare. Myndigheten noterade vidare att SKB har uppmärksammat kommentarerna som lämnades på Fud-program 2007 avseende provning och verifiering av hydrogeologiska modeller, hantering av variabilitet i sprickapertur, storregional grundvattenmodellering och kopplingar mellan grundvattenströmning i jord och berg. Vidare noterade SSM att SKB har hanterat kommentarerna som lämnades vid granskningen av SAR-08 (SKB 2008a).

SSM såg även positivt på att SKB planerade att ytterligare undersöka hur DFN-modeller kan genereras och parametreras för att bättre återspegla de verkliga hydrogeologiska förhållandena. Myndigheten ansåg att frågan, om den av SKB förmodade överskattningen av flödena i modellerna, bör utredas ytterligare för att förbättra förståelsen av systemet. SSM ansåg därutöver att SKB bör studera modellering av flöde genom nätverk av kanaler för att utröna konceptuella osäkerheter i flödesberäkningar med spricknätverks- och kontinuummodeller.

SSM ansåg vidare att grundvattenutströmning under havsytan bör beaktas av SKB vid grundvattenflödesmodelleringar.

SSM ansåg det även vara angeläget att SKB fullföljde planerna att konceptualisera flödesmodeller under perioder med inlandsis och permafrost utgående från resultat från GAP.

SSM ansåg, liksom vid granskningar av tidigare Fud-program, att SKB bör bedriva insatser för att stärka de hydrogeologiska modellernas trovärdighet. Exempel på betydelsefulla frågor är uppskalning av parametrar från mätdata, överföring av randvillkor i komplexa modeller samt hydro-DFN-modellernas validitet och deras resultatets relevans för olika avnämare.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2010

Föregående Fud-period karakteriserades av avslutningen av det pågående säkerhetsanalysprojektet SR-Site. Redan i Fud-program 2010 redogjordes sålunda för de flesta hydrogeologiska modelleringsresultat och rapporter som senare låg till grund för redovisningen i SR-Sites slutrapport. Ytterligare ny vunnen kunskap har dock kommit till genom kompletterande studier som inte hann redovisas i Fud-program 2010.

Det främsta bidraget här är en utveckling av den så kallade hydro-DFN-metodiken som togs fram sent inom platsmodelleringen för Laxemar (Joyce et al. 2010). Nya element i den uppdaterade metodiken är främst att enskilda borrhål simuleras (snarare än att samtliga borrhål slås samman) med aktuell lutning (snarare än ett perfekt vertikalt borrhål), att deformationszoner inkluderas i simuleringen samt att de olika sprickseten kalibrerades var för sig (snarare än sammanslaget). Denna nya metodik har även fungerat som underlagsmaterial då ett nytt projekt för geologisk och hydrogeologisk diskret spricknätverksmodellering har planerats, se vidare avsnitt 26.24.1 DFN för en presentation av det nya projektet.

Under föregående Fud-period ägnades även tid och resurser åt att sammanfatta de hydrogeologiska simuleringar som utförts inom SR-Site. En sammanfattande rapport (Selroos och Follin 2010) beskriver den övergripande hydrogeologiska modelleringsstrategin samt modelluppsättningarna inom SR-Site. Vidare beskriver rapporten de viktigaste resultaten, samt hur dessa har använts inom övriga discipliner inom säkerhetsanalysen. Vidare har de viktigaste hydrogeologiska analyserna samt resultaten från platsmodelleringen (SDM-Site) och säkerhetsanalysen (SR-Site) beskrivits i sju vetenskapliga artiklar som publicerats i en sammanhängande serie i tidskriften *Hydrogeology Journal*.

Inom glacial hydrogeologi har kunskapsutvecklingen gått starkt framåt sedan Fud-program 2010. Både projektet GAP (se avsnitt 19.7) och analyser inom SR-Site har bidragit till utvecklingen. Specifikt har randvillkorssättningen, kopplat till en överliggande is, i hydrogeologiska modeller analyserats (Vidstrand et al. 2012). Även hydrogeologiska modeller i stor skala har upprättats över området där GAP utförs (Jaquet et al. 2010, 2012). I dessa modeller har man specifikt undersökt effekten av permafrostfördelning framför (inkluderande taliks) och under isen, effekten av olika randvillkorssantaganden för is/berg gränssnittet samt effekten av topografins upplösning i modellen. Vidare har man studerat hur platsspecifika data kan inkorporeras i modellerna. Framsteg har även gjorts inom transportmodellering kopplat till glaciala flödesförhållanden; detta beskrivs i avsnitt 26.24.4 Integrerad modellering – radionuklidtransport.

Under perioden har även en kodutveckling skett för att kunna simulera kopplade hydrogeologiska och hydrogeokemiska problem. Modelleringsverktyget ConnectFlow har utvecklats vidare, bland annat har möjligheter att inkludera geokemi och grundvattenkemi lagts till genom att integrera PhreeqC. Detta beskrivs ytterligare i avsnitt 26.24.3 Integrerad modellering – hydrogeokemisk utveckling.

Övrig kodutveckling som skett är främst kopplad till simulering av yhydrologi. Här har funktionalitet tagits fram för att importera olika yobjekt såsom vattendrag och sjöar som CAD-objekt. Detta ger en modellhantering med möjlighet att på ett enklare sätt representera viktiga delkomponenter i det yhydrologiska systemet. Vidare har Navier-Stokes-lösaren i DarcyTools fortsatt att utvecklas med syfte att kunna hantera strömning just i det yhydrologiska systemet. De övriga, tidigare tänkta möjliga applikationerna såsom injektering, flöde i matris, samt subglacialt flöde har inte vidare utvecklats då konkreta behov inte uppstått.

Kodutveckling som skett inom ConnectFlow är främst ny metodik för att kunna simulera densitetsdriven strömning i diskreta spricknätverk. Detta är en generalisering av den tidigare metodiken, som bland annat användes i SR-Site, där densiteten är tidsberoende. Vidare har en alternativ metodik för

att beskriva matrisdiffusion implementerats baserat på ett finit volyms-angreppssätt som möjliggör bland annat användandet av variabla parametrar för olika kemiska species. Förbättringar har också gjorts i det grafiska gränssnittet.

Ny kunskap kring kopplade hydromekaniska frågeställningar har kommit fram inom icke-SKB-finansierade projekt. Skjuvspänningens påverkan på transmissivitetfördelningen och resulterande flöde i en enskild spricka har studerats numeriskt i Vilarrasa et al. (2011). Resultaten indikerar att en pålagd skjuvspänning resulterar i en anisotrop transmissivitetfördelning. Denna leder i sin tur till att flödet i den transversella riktningen mot skjuvspänningen blir högre än flödet i en riktning parallell mot skjuvspänningen.

Program

De olika insatser som planeras i det kommande programmet kan delas in i tre principiella kategorier. Dessa är insatser riktade för att uppnå ökad processförståelse, insatser för att integrera hydrogeologiska beräkningsverktyg med andra relevanta discipliner såsom hydrokemi, geologi, bergmekanik, samt klimatstudier. Den tredje kategorins insatser rör kodunderhåll. Nedan beskrivs de olika planerade insatserna enligt denna kategorisering.

Två doktorandprojekt bedrivs med syfte att öka förståelsen av viktiga processer och uppnå ny kunskap kring hur olika typer av data kan användas i modellering. Det första projektet handlar om grundvattenströmning och transport av lösta ämnen från storregional skala ner till lokal avrinningskala (catchment scale). Syftet är att uppnå en internt konsistent metodik för att simulera grundvattenflöde och transport över multipla skalor, och sedan undersöka vilka skalor som behöver beaktas för olika applikationer. Detta uppnås genom att beskriva den rumsliga variabiliteten på ett konsistent sätt över samtliga relevanta skalor. Projektet bygger vidare på de erfarenheter som SKB gjort inom storregional grundvattenströmning under senare år (Ericsson och Holmén 2010), men kommer möjligtvis att även utnyttja annan metodik och andra koder än tidigare projekt utförda i SKB:s regi. Tanken är även studera olika klimatförhållanden, det vill säga både dagens klimat och framtida glaciala förhållanden, och relatera klimatförhållanden och skalfrågor. Vidare ingår att studera hur snabba flödestransienter påverkar ämnestransport på olika avrinningsområdesskalor.

Det andra doktorandprojektet handlar bland annat om hur olika typer av data som fås vid undermarksbyggande (det vill säga byggande av tunnlar, ramp och schakt för Kärnbränsleförvaret) kan utnyttjas i grundvattenflödesmodellering. Här används kanalnätverkskoden Chan3D som utvecklas på KTH. Se vidare avsnitt 26.24.4 Integrerad modellering – radionuklidtransport.

Ett antal projekt planeras som på olika sätt syftar till koppling mot andra ämnesområden. Projekten med kopplade hydrogeologiska och hydrogeokemiska modeller förstärker. Dessa projekt inkluderar integration av PhreeqC i ConnectFlow och en koppling av DarcyTools med Pflotran. Detta beskrivs ytterligare i avsnitt 26.24.3 Integrerad modellering – hydrogeokemisk utveckling.

Som nämndes ovan så planeras ett projekt för framtagande av en ny metodik för geologisk och hydrogeologisk diskret spricknätverksmodellering. Detta projekt beskrivs i detalj i avsnitt 26.24.1 DFN. Här kan poängteras att det finns två primära syften med projektet. Det ena är att få fram en enhetlig metodik för både geologisk och hydrogeologisk spricknätverksmodellering. Det andra syftet är att ta fram metodik för hur de tidigare använda rent stokastiska modellerna kan uppnå högre grad av determinism genom att använda lokalt mätta storheter i tunnlar och borrhål.

Projektet GAP kommer att slutrapporteras under den kommande Fud-perioden. Det finns dock arbete kvar att göra när det gäller hur insamlade data ska användas för att öka förståelsen av specifikt det subglaciala lagrets roll för grundvatteninfiltration under glaciala förhållanden. Det subglaciala lagret utgör kontakten mellan ovanför liggande is och berget under. Genom att utföra modellering med olika antaganden om detta lagers egenskaper och funktion, samt jämföra simulerade och uppmätta data på tryck och flöden, kan en ökad förståelse förhoppningsvis uppnås. Vidare planeras modelleringprojekt för att studera permafrostutveckling (se avsnitt 19.5 Permafrost) och resulterande grundvattenflödesfördelning i ett realistiskt avrinningsområde; Forsmarks platsbeskrivande modell som användes i SR-Site kan vara lämplig för detta ändamål. Frågeställningar här är hur permafrost och kopplat grundvattenflöde utvecklas transient då ett successivt kallare klimat råder. Som en inledande studie görs simuleringar i en förenklad tvådimensionell modell.

Ett projekt planeras även för att inkludera en mekanisk komponent i simuleringsverktyget DarcyTools. Detta innebär att kopplade hydromekaniska frågeställningar kan belysas. Med denna version av koden skulle man till exempel kunna analysera hur en islast påverkar de hydrauliska egenskaperna, specifikt sprickors transmissivitet, och därmed flöde, samt hur tunnelbyggande kan påverka de hydrauliska egenskaperna. Denna utveckling samordnas med utvecklingsprojektet om konceptuell förståelse av bergmassans hydromekaniska egenskaper som beskrivs under Program i avsnitt 26.24.2 Integrerad modellering – termo-hydro-mekanisk utveckling.

När det gäller kodunderhåll och kodutveckling så planeras ett test av en ny uppskalningsalgoritm för användning i DarcyTools. En begränsning med den nuvarande uppskalningsalgoritmen är att den resulterar i isotropa egenskaper i samtliga riktningar för beräkningscellerna. Om inte tillräckligt hög numerisk upplösning används blir effekten att anisotropi orsakad av preferentiell sprickorientering går förlorad vid uppskalningen. Alternativa metoder som bevarar anisotropin ska utvärderas och inkorporeras i DarcyTools om de visar sig användbara.

Ett annat kodutvecklingsprojekt i DarcyTools är att knyta ihop den nya funktionaliteten för yhydrologiska objekt med Navier-Stokes-lösaren. Tanken här är att använda Navier-Stokes-lösaren i en separat beräkning för vattenströmning i vattendrag, sjöar och kustområden. Separat används grundvattenflödesmodellen som genererar en spatiellt utbredd källterm längs med de yhydrologiska objekten för användning i Navier-Stokes-modellen. Modellerna, som sålunda är kopplade via en källterm, måste modifieras för att kommunikationen mellan de olika koderna ska ske på ett smidigt och automatiserat sätt.

Även inom ConnectFlow planeras viss kodutveckling. Detta gäller främst implementering av den nya metodiken för fullt kopplat transient flöde i diskreta spricknätverksmodeller. Utveckling krävs även för att inkorporera matrisdiffusion i denna typ av modell, samt att hantera kopplad transient densitetsdriven strömning i kombinerade diskreta modeller och kontinuummodeller.

26.4.3 Specifika frågeställningar kopplade till Kärnbränsleförvaret

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Specifika frågeställningar kopplade till Kärnbränsleförvaret omnämndes inte i Fud-program 2010.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Inom detaljundersökningsprojektet har SKB gått igenom de metodiker som kan tänkas vara användbara inom mätning och modellering för detaljerade platsundersökningar med avsikten att identifiera lämpliga förbättringar, se vidare avsnitt 14.4.2 Undersökningar och modellering. Inom hydrogeologisk modellering har man specificerat ett antal områden som bör förbättras. Dessa är främst detaljerad platsbeskrivande modellering och modellering av närzonen till tunnlar och deponeringshål. Inom detaljerad konceptuell platsmodellering är det främst integration med andra discipliner (geologi, kemi, bergmekanik, ytsystem) som bör förbättras men även en allmän uppdatering av modelleringsmetodiken föreslås. Inom modellering av närzonen till tunnlar och deponeringshål har SKB identifierat ett behov av att utveckla en metodik för att bedöma om en deponeringstunnel eller ett deponeringshål är lämpligt eller inte för deponering. De uppdaterade metodikerna ska dokumenteras i manualer för detaljundersökningar.

Inom de hydrogeologiska områden som kopplar mot andra discipliner har SKB identifierat ett behov av att följa den pågående eller planerade utvecklingen. Dessa områden är modellering av deformationszoner och stora sprickor, DFN, geokemi och radionuklidtransport.

Program

Inom detaljundersökningsprogrammet har SKB inom det hydrogeologiska området identifierat ett behov av att följa den pågående eller planerade utvecklingen i fråga om hur ämnesområdet kopplar mot andra discipliner. Som nämndes ovan är dessa områden modellering av stora sprickor och deformationszoner, DFN, geokemi och radionuklidtransport. Inom detaljundersökningsprogrammet hydrogeologi ska dock ett utvecklingsprojekt utföras, som innebär en koppling mellan grundvattenflöde och geokemi. Denna görs genom att ett gränssnitt skapas mellan DarcyTools och

beräkningsverktyget Pflotran. Pflotran är en generell grundvattenflödes- och transportkod som även hanterar geokemi; i det aktuella projektet ska dock enbart geokemifunktionaliteten användas. Denna utveckling innebär att DarcyTools får motsvarande funktionalitet som ConnectFlow med avseende på möjlighet att simulera kopplad hydrogeologisk-geokemisk utveckling.

En viktig frågeställning för Kärnbränsleförvaret är om ogynnsamma positioner för deponeringshål kan undvikas. I SR-Site användes geometriska kriterier (FPC, EFPC), men inledande analyser indikerade att inflödeskriterier kan vara verksamma. Ytterligare analyser planeras för att undersöka om inflödeskriterier är verksamma, samt hur dessa ska definieras samt tillämpas i praktiken. I ett första steg planeras ett omtag av inflödesanalyserna i SR-Site med koden ConnectFlow (i SR-Site användes DarcyTools). ConnectFlow är en diskret spricknätverksmodellkod där inflöde i enskilda sprickor kan simuleras mer noggrant än vad som gjordes i SR-Site. I en efterföljande fas ska olika hydrauliska tester simuleras i den framtagna modellen med syfte att se om ogynnsamma positioner kan identifieras med hjälp av hydrauliska tester. Dessa aktiviteter samordnas med vad som görs inom detaljundersökningsprogrammet.

26.4.4 Specifika frågeställningar kopplade till SFR och SFL

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Specifika frågeställningar kopplade till SFR och SFL omnämndes inte i Fud-program 2010.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

Under perioden 2010–2012 genomfördes tre studier med syftet att nå en ökad förståelse för hur uppmätta och modellerade geologiska och hydrogeologiska förhållanden i SFR-området påverkar grundvattenflödet inom regionalområdet för utbyggnaden av SFR (PSU):

- Öhman och Follin (2010) redovisar en hydrogeologisk sprickmodell (Hydro-DFN) för bergmassan mellan sprickzoner baserad på en preliminär version av deformationszonsmodellen för PSU (Curtis et al. 2010), insamlade hydrotestdata uppmätta med Posivas flödeslogg och sprickorienteringsdata från Bips-borrhålskamera.
- Öhman et al. (2011a) redovisar en konceptuell hydrogeologisk modell för berggrunden baserat på en uppdatering av deformationszonsmodellen (Curtis et al. 2011). Den hydrauliska parametreringen av deformationszoner och bergmassans Hydro-DFN baserar sig på alla tillgängliga hydrotestdata i området, det vill säga såväl äldre SFR-data som nyare PSU-data.
- Öhman et al. (2011b) redovisar flödessimuleringar där detaljeringsgraden i modelluppställningen ökas stegvis i syfte att studera hur känsligt grundvattenflödet är för olika tolkningar av uppmätta data. Målet med flödessimuleringarna är att utvärdera den konceptuella modellens tillförlitlighet inför säkerhetsanalysprojektet för utbyggnaden av SFR, SR-PSU.

Inom det regionala modellområdet för PSU har 40 deformationszoner med längder större än 300 meter identifierats av Curtis et al. (2011). Alla zoner utom tre har tolkats vara brantstående-vertikala. Curtis et al. (2011) redovisar även 31 borrhålsintervall med egenskaper liknande deformationszoner (till exempel intervall med förhöjd sprickfrekvens). Dessa har inte inkluderats som deformationszoner i den geologiska modellen därför att de inte kan modelleras i 3D enligt den metodik som använts, se Curtis et al. (2011), där intervallen ifråga betecknas PDZ (från engelskans Possible Deformation Zones).

Öhman et al. (2011a) noterar att majoriteten av alla hydrotestdata som uppmätts inom PSU-projektet i området för utbyggnaden av SFR sammanfaller med subhorisontella sprickor, samt att flera av de mest transmissiva subhorisontella sprickorna korrelerar väl med ovan nämnda PDZ-intervall. Öhman et al. (2011a) analyserar samtliga PDZ-intervall ur hydrogeologisk synvinkel och noterar bland annat att hydrauliska interferenser ställvis detekterats mellan olika borrhål och att interferenserna i en del fall kan tolkas som att det förekommer konnekterade subhorisontella strukturer mellan olika PDZ-intervall. Åtta av de mest centralt belägna subhorisontella strukturerna inom det regionala modellområdet har modellerats deterministiskt av Öhman et al. (2011a) i den redovisade konceptuella hydrogeologiska modellen. Strukturerna betecknas SBA1-SBA8 (från engelskas Shallow Bedrock Aquifer) och fyra av dessa sammanfaller med ovan nämnda PDZ-intervall. Utöver SBA-strukturerna föreslår Öhman et al. (2011a) att sju stycken PDZ-intervall modelleras med så kallad betingad stokastisk modellering, samt att data som sammanfaller med SBA-strukturer och PDZ-intervall inte integreras i hydro-DFN-modellen för bergmassan.

Tidigare grundvattenmodeller, som utvecklats för säkerhetsanalyserna SAFE och SAR-08 (Holmén och Stigsson 2001, Holmén 2005), kalibrerades mot uppmätt inflöde till den befintliga SFR-anläggningen. I SFR-utbyggnaden har grundvattenmodellen inte kalibrerats mot inflödet till SFR. Det finns två anledningar till denna ändring i metodik:

- Området tänkt för utbyggnaden av SFR innefattar geologiska strukturer som inte är i direktkontakt med den befintliga SFR-anläggningen, det vill säga strukturer med ringa eller inget bidrag till uppmätt tunnelinflöde till SFR.
- Det avtagande inflödet till SFR över tid (cirka 60 procents minskning på 22 år), i kombination med tilltagande avsänkning, tyder på en transient förändring i de hydrauliska egenskaperna kring den öppna SFR-anläggningen. Detta väcker frågor angående hur representativa uppmätta data (tryck och inflöde) är för att kalibrera grundvattenmodellen med tanke på att det är framtida vattenmätade förhållanden som analyseras i säkerhetsanalysen.

I stället för en kalibrering mot uppmätt inflöde till SFR genomförde Öhman et al. (2011b) en känslighetsanalys, se ovan.

Den hydrogeologiska modelleringen som utförts inom ramen för säkerhetsanalysprojektet SR-PSU under den aktuella perioden ingår i underlaget för ansökan till ett utbyggt SFR. En ny metodik för att modellera framtida landskapsutveckling har använts inom biosfärsmodelleringen; framtida jordlagerförhållanden och läget för framtida sjöar och åar (inklusive djup och tröskelvärden) har beräknats för olika strandlinjepositioner. Detta medför att en noggrannare beskrivning fås av ythydrologin, vilket är speciellt fördelaktigt när grunda förvar analyseras. Ett antal studier har genomförts för att hitta lämplig lokalisering och utformning av en utbyggnad av SFR. Vidare har olika parametreringar av bergets hydrauliska egenskaper studerats för att hantera osäkerheter i beskrivningen av berget.

Program

Som en uppföljning av säkerhetsanalysen av SFR (SR-PSU) ska den använda modelleringsmetodik utvärderas och jämföras med motsvarande metodik som användes i SR-Site. Inom de olika projekten användes olika koder för grundvattenmodellering (DarcyTools eller ConnectFlow. Mike She användes i båda projekten). Syftet är att utvärdera hur koderna fungerade, göra jämförande analyser och testkörningar, samt om möjligt formulera en gemensam strategi för kommande analyser.

En studie av olika förvarskoncept för SFL med bland annat en kvalitativ bedömning av deras långsiktiga säkerhetsfunktion pågår. Målet med studien är att välja ett eller ett par förvarskoncept att arbeta vidare med, se vidare under Nuläge i kapitel 6.

26.4.5 Task Force för grundvattenflödes- och transportmodellering

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SSM såg positivt på SKB:s planer att vidare studera den hydrauliska interaktionen mellan berg och bentonit vid ett deponeringshål.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Inom SKB Task Force för grundvattenflödes- och transportmodellering har Task 7 om platsmodellering i olika skalor med mätdata från flödesmätningar, avslutats. Slutsatserna har publicerats i ett antal modelleringsrapporter och som bidrag i vetenskapliga publikationer (till exempel Frampton 2013).

Inom Task 8 har modellering utförts kopplat till experimentet Brie (Bentonite Rock Interaction Experiment) som utförs i Äspölaboratoriet. Där studeras den hydrauliska interaktionen mellan berg och bentonit vid två nedskalade deponeringshål som är 30 centimeter i diameter. Återmättnadsprocessen är här en central del av frågeställningen. Även effekten av bergspänningar på främst bergets vattengenomsläpplighet och därmed på förvarets funktion studeras med kopplade hydrauliska-mekaniska modeller.

Program

Inom Task 7 ska modelleringsrapporterna utvärderas av en extern granskare.

Task 8 kommer att fortsätta med modellering av Brie och möjligen också modellering av ett försök med liknande problemställning fast i större skala. Task 8 kommer att rapporteras av modellörerna och utvärderas av en extern granskare.

Arbetet med att starta en ny modelleringsuppgift, Task 9, har påbörjats. Det är möjligt att den kommer att innehålla modellering av försök som undersöker bergets transportegenskaper såsom matrisdiffusion och sorption. En lämplig kandidat för modelleringsövningen skulle kunna vara experimentet Repro (Aalto et al. 2009) som genomförs i Onkalo i Finland.

26.5 Gasströmning/gaslösning

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Behandlingen av ämnesområdet gasströmning/gaslösning i Fud-program 2010 sammanfaller med vad som sades om återmättnadsprocesser under Task 8 i Task Force för grundvattenflödes- och transportmodellering.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2010

Programmet avseende gasströmning/gaslösning sammanfaller med det som beskrivs i avsnitt 26.4.5 Task Force för grundvattenflödes- och transportmodellering, om återmättnadsprocesser och specifikt Task 8. Inom Task 8 används data från experimentet Brie på Äspölaboratoriet. Återmättnadsresultaten från experimentet simuleras såväl inom Task Force för grundvattenflödes- och transportmodellering som inom Task Force för modellering av tekniska barriärer.

Återmättnad av bentonit i en deponeringstunnel har modellerats av Svensson (2009), medan återmättnad av deponeringshål har modellerats inom Task 8. Modelleringsresultaten i Task 8 indikerar att det blir en stor skillnad i tid för återmättnaden om den hydrauliska kontakten är diskret i sprickor eller om den är jämt fördelad över en kontaktyta mellan två hypotetiskt homogena material. Analys av återmättnadstiden för bentonit svarar på frågan hur snabbt förvaret går från initialtillståndet efter förslutning till det mättrade tillstånd, som oftast antas i grundvattenflödesberäkningar för långsiktig säkerhet.

Laboratorieresultaten indikerar att den framtagna materialmodellen för bentoniten är väl lämpad för att representera vattenupptagsprocessen i fältförsöket. In situ-resultaten från fältförsöket indikerar att vattenupptaget främst sker genom sprickflöde. Den slutliga bedömningen av matrisflödets omfattning kan göras först efter brytningen av försöket.

Program

Brie-försöket avslutas under 2013, men modelleringsinsatserna och analysen av resultaten fortsätter inom Task Force för grundvattenflödes- och transportmodellering. Både återfuktning av bentonit och berg ska modelleras. Dessutom undersöks interaktionen mellan dessa och inverkan av om den hydrauliska kontakten är jämt fördelad eller diskret, det vill säga begränsad till de ställen där sprickor skär deponeringshålen.

26.6 Rörelser i intakt berg

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 redovisades ett projekt med inriktning på eventuell spjälkningseffekt i kapselhål. I ett experiment i Äspölaboratoriet undersöktes mothållseffekten i ett antal borrhål med cirka 500 millimeters diameter. Fältförsöket Caps (Counterpressure Applied to Prevent Spalling) använde lecakulor för att simulera mothållande effekt av icke-vattenmättade pelletar av bentonit. Försöken tyder på att

det lilla mothållande tryck som lecaikulorna gav upphov till, är tillräckligt för att begränsa spjälkningen och förhindra uppkomsten av en starkt genomsläpplig zon av uppsprucket berg i de aktuella 500-millimetershålen (Glamheden et al. 2010). Ett program hade även genomförts inom ramen för platsundersökningarna för att med hjälp av triaxiell belastning och mikroskopstudier kvantifiera graden av spänningsinducerade mikrosprickor i borrhärlor från några djup från både Forsmark och Laxemar (se till exempel Jacobsson 2006a, b).

I sin granskning såg SSM positivt på SKB:s fortsatta utvecklingsarbete i samarbete med Posiva när det gäller spjälkning och framhöll att SKB bör ta hänsyn till den platsspecifika situationen i Forsmark i detta arbete. SSM ansåg vidare att det är positivt att SKB har en beredskap för att resultat från SR-Site kan komma att leda till behov av vidare studier. Därutöver ansåg SSM att SKB bör göra ytterligare insatser för att visa att resultat från Caps-försöket kan överföras på fullstora deponeringshål i bergförhållandena som råder i Forsmark.

SSM ansåg därutöver att SKB bör studera inverkan av spricknätverkets geometri på spjälkningen och dess konsekvenser för säkerhetsanalysen. En av SSM finansierad studie pekar på att det skulle kunna uppträda dragsprickor runt kapselhålen vid fullt bentonitsvälltryck så länge temperaturspänningarna inte är fullt utvecklade (Backers och Stephansson 2008). SSM ansåg att SKB bör beakta dessa resultat i sitt fortsatta arbete. SSM noterade att SKB inte redovisade några planer på att försöka minska osäkerheterna i bergspänningsmodellen för Forsmark och ansåg att SKB bör göra fortsatta ansträngningar för att minska dessa osäkerheter. Myndigheten ansåg vidare att SKB bör följa upp de tidigare ansatserna som förefaller ha gett lovande resultat för Laxemar (Mas Ivars och Hakami 2005, Hakami 2006, Hakami och Min 2009). SSM ansåg vidare att SKB bör studera hur bergspänningsmodellerna för Kärnbränsleförvarets närområde förhåller sig till de storskaliga spänningsmodellerna som används för att beräkna spänningarna under en glacial cykel (Lund et al. 2009).

Nyvetenskap sedan Fud 2010

SKB har medverkat i utvecklingsarbetet om spjälkning inom ramen för projektet Posiva Spalling Experiment (Pose) som drivits av Posiva. Preliminära resultat visar att sprickpropagering är mycket känslig för variation av anisotropi i bergets hållfasthet (Siren 2011). Friktion och kohesion har stor betydelse för hur sprickor initieras, medan sprickrätets storlek inte har speciellt stor betydelse för sprickutveckling, när den väl initierats. Den avslutande fasen av experimentet slutförs under 2013 (Christiansson et al. 2012).

Buffertens maximala svälltryck är 15 megapascal (SKB 2011e, figur 8-2). Analyser av närfältsberget i Forsmark för olika antaganden om in situ-spänningarnas storlek och orientering visar att de tangentiella tryckspänningarna efter uttag av deponeringshål inte någonstans understiger cirka 20 megapascal (Hökmark et al. 2010). Detta innebär att det finns, även om man inte tillgodoräknar det termiskt genererade tangentiella tryckspänningstillskottet, en marginal av cirka fem megapascal mot dragbrott i deponeringshållsväggarna. THM-analyserna av närfältsberget visar dessutom att det termiskt genererade tryckspänningstillskottet växer till cirka 15 megapascal redan under den första månaden efter deponering (Hökmark et al. 2010). Detta medan THM-analyser av buffert-bergsystemet, gjorda för olika antaganden om bergets hydrauliska konduktivitet, förekomst av skärande, vattenförande sprickor etc, visar att det tar minst cirka sju år att uppnå full vattenmättnad (Åkesson et al. 2010). Den väsentligt snabbare utvecklingen av de termiskt genererade tangentiella tryckspänningarna innebär alltså att marginalen till dragbrott kommer att vara mycket större än fem megapascal under hela den termiska fasen. Efter cirka 10 000 år är de termiskt genererade tangentiella tryckspänningarna nere i cirka fem megapascal, vilket innebär att marginalen mot dragbrott i deponeringshållsväggarna då har minskat till cirka 10 megapascal.

Program

Arbetet med att förklara, hantera och dämpa termiskt inducerad spjälkning kommer att fortgå kontinuerligt då detta påverkar en av säkerhetsfunktionerna. Eventuella ytterligare beräkningsinsatser kommer emellertid att ha begränsad omfattning, då termiskt inducerad spjälkning, enligt slutsatserna i SR-Site (SKB 2011e, avsnitt 15.7.4), inte är kritisk för långsiktig säkerhet.

SKB har initierat ett doktorandprojekt med rubriken Spänningsinducerad spjälkning, hantering och åtgärder. Projektet innebär utveckling av numeriska och laborativa metoder för att bedöma potentialen för spjälkning och för att öka förståelsen av brottpropagering i kristallint berg. Metoder för att karakterisera källor till osäkerhet med statistiska metoder och uppskatta hur känsligt resultatet är för dessa osäkerheter bör tas fram. Osäkerhetsbedömningar bör beakta både bergmaterialets naturliga variabilitet och felkällor i provningsmetoder. Resultaten av den omfattande bergmekaniska provning som utförts främst inom platsundersökningarna, samt samverkan med Commission on Rock Spalling inom International Society for Rock Mechanics (ISRM), kommer att utgöra grunden för arbetet. Studie av alternativa provningsmetoder för att bestämma spänningsnivån där spjälkning kan inträffa ska vara en huvudaktivitet. Tillämpning bör göras på olika bergartstyper, till exempel från Äspö, Forsmark och Onkalo. Samverkan med Posiva Spalling Experiment (Pose) är planerad.

26.7 Termisk rörelse

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 redovisades att den analytiska termomekaniska lösningen för Kärnbränsleförvaret vidareutvecklats så att man kan analysera fall med flera olika deponeringsområden. De ursprungliga ekvationerna har kodats till lätt användbara matematiska kalkylblad och har tillämpats vid känslighetsanalyser och vid analyser av hur deponeringssekvensen kan inverka på närfältsutvecklingen (Hökmark et al. 2010).

Preliminära resultat förelåg för den termomekaniska utvecklingen i Prototypförvaret vid Äspölaboratoriet. Analysen är nu slutförd, se nedan. Vidare hade en litteraturstudie om tryckberoendet hos den termiska expansionskoefficienten hos typiska bergarter i förvarsberget initierats.

SSM ansåg att SKB bör genomföra modellstudier om propagering av befintliga sprickor samt initiering av nya sprickor i omgivande berg på grund av termiska spänningar runt deponeringshålen och deponeringstunnlarna. Exempelvis pekar den av SKI finansierade studien av Rutqvist och Tsang (2008) på att det finns risk för kontinuerliga dragbrott i väggarna för deponeringstunnlarna under den termala fasen. SSM ansåg därutöver att SKB bör göra ytterligare insatser för att minska osäkerheterna i beräkningarna av den termiska utvecklingen i närområdet.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

Analysen av den termomekaniska utvecklingen i Prototypförvaret vid Äspölaboratoriet är nu genomförd. Den visar att den metod, eller ansats, som tillämpas i modelleringen av den termomekaniska utvecklingen i Forsmark ger trovärdiga resultat. Till exempel visar det sig att temperaturer uppmätta på olika avstånd och i olika riktningar från Prototypförvarets värmare kan reproduceras väl med hjälp av de termiska samband som finns inbyggda i det numeriska verktyget 3DEC. De beräknade spänningarna runt deponeringshålen, tangentialspänningarna, ligger strax under den spjälkningshållfasthet som bestämts i Apse- och Caps-försöken. Vid besiktning av hålväggarna efter försökets avslut kunde man också konstatera att någon spjälkning inte ägt rum, vilket visar att beräkningarna inte underskattat spänningarna med något betydande belopp (se även avsnitt 13.11 Prototypförvaret, delavsnitt Resultat).

Jämförelse med akustisk emissionsdata bekräftar den beräknade lokaliseringen av spänningskoncentrationerna under uppvärmningsfasen. Även om dessa observationer stöder beräkningsresultaten, räcker de inte till någon direkt kvantitativ verifiering av spänningsberäkningarna. De direkta spänningsmätningar som gjorts i några positioner runt de två yttre deponeringshålen bekräftar spänningarnas storleksordning under uttagsfasen, men har visat sig vara otillförlitliga under den följande termiska fasen. De instrument som installerats för deformationsmätningar har inte fungerat som avsett och har inte kunnat användas för jämförelse med de beräknade deformationerna. Sammanfattningsvis har analysen av Prototypförvaret bekräftat den metodik för termomekanisk modellering som tillämpas för Forsmark i princip och när det gäller spänningars storleksordning, men inte när det gäller exakta spänningar och deformationer.

Det möjliga tryckberoendet hos den termiska expansionskoefficienten hos typiska bergarter i förvarsberget är kartlagd genom en litteraturstudie. Avsikten har varit att bedöma risken för att termospanningarna i förvaret underskattas, på grund av att parametervärden bestämts genom försök på obelastade prover. Kortfattat visar litteraturstudien att en sådan underskattning, om den alls är en reell möjlighet, skulle bero på att mineralkornen vid testning av obelastade prov expanderar in i existerande mikrosprickor i stället för att fullt ut bidra till provkroppens volymutvidgning. Vid test av belastade prov skulle mikroporositeten i förväg vara blockerad så att kornens volymutvidgning i högre grad bidrar till provkroppens utvidgning. Tanken att denna process är möjlig är baserad på observerade skillnader mellan teoretiskt beräknade och faktiskt uppmätta volymutvidgningskoefficienter. För de fall den uppmätta koefficienten har varit mindre än den beräknade, visar det sig att mikroporositeten hos den aktuella bergarten har varit väsentligt större än för de bergarter som dominerar i Forsmark. Dessutom har dessa prover, jämfört med de prover som har gett en bättre överensstämmelse mellan beräknad och uppmätt volymutvidgning, en uttalad anisotropi i mikrosprickstrukturen. Det finns därför inga belägg för att denna process, det vill säga att mineralkornen hos obelastade prover expanderar på mikroporositetens bekostnad, kan ha gett en underskattning av den volymutvidgningskoefficient som kommer att gälla när det inspända berget i Forsmark värms upp. Det är snarare troligt att det kan finnas en liten överskattning i de värden som rapporterats. Dels finns det ett litet men fundamentalt tryckberoende på kristallgitternivån, dels har mätningarna gjorts för temperaturökningar ända upp till 80 °C, det vill säga cirka 20 °C utöver de maximala temperaturerna i förvarsberget.

Generell utveckling av koder för modellering har initierats för att bland annat öka förståelsen av storskaliga termo-mekaniska processer, se vidare avsnitt 26.24.2 Integrerad modellering – termo-hydro-mekanisk utveckling. Nuvarande kunskap bedöms dock tillräcklig för att kunna gränssätta betydelsen av den termiskt inducerade rörelsen för den långsiktiga säkerheten.

Program

Termospanningar kan, i alla fall teoretiskt, ge belastningar på deformationszoner i förvarsberget som möjligen kan trigga seismiska rörelser. Beräkningar som kvantifierar de möjliga effekterna på Kärnbränsleförvaret av sådana termiskt inducerade skalv kommer att genomföras. Metodiken är den som också används för att kvantifiera effekter av postglaciala skalv.

Möjligheten av underskattningar/överskattningar av den termiska expansionskoefficienten kommer att utredas närmare.

26.8 Reaktivering – rörelse längs befintliga sprickor

Rörelse längs befintliga sprickor relaterar till strukturgeologi och tektonik, det vill säga huvudsakligen frågeställningar om jordskalvspåverkan och effekter av så kallade glacialt inducerade förkastningar.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 beskrevs arbetet med att utveckla och analysera modeller av jordskorpanns stabilitetsförhållanden och spänningsutveckling under en glaciationscykel. Arbetet hade främst skett inom ramen för säkerhetsanalysen SR-Site. Det övergripande målet var att ta fram randvillkor i ett regionalt perspektiv för bergspänningsutvecklingen i Laxemar och Forsmark under en glaciationscykel. Stabiliteten hos förkastningar i Laxemar och Forsmark hade analyserats under förutsättning av seismogeniskt djup av 9,5 kilometer (Lund et al. 2009).

En studie av potentialen för hydraulisk uppspräckning (på engelska ”hydraulic jacking”) i samband med en glaciation hade genomförts (Lönnqvist och Hökmark 2010). Den hydrauliska spräckningen bedömdes enligt analysen inte kunna nå djup under cirka 250 meter. Vidare presenterades en utvidgad numerisk analys av effekterna av jordskalv på förvarsbergets sprickor (Munier och Hökmark 2004, Fälth och Hökmark 2006).

Förändringarna i transmissivitet hos sprickorna i närområdet vid bygge, vid termisk last och under en glaciationscykel hade utvecklats med hänsyn till termomekaniska närfältsmodeller (Hökmark et al. 2006). För utvecklingen under glaciationscykeln används spänningsdata som tagits fram med nya tredimensionella analyser av den senaste glaciationen (Lund et al. 2009). En mer realistisk spännings-transmissivitetsmodell hade utvecklats med parametervärden från sprickor i Forsmark (Glamheden et al. 2008) samt utifrån en litteraturstudie (Fransson 2009).

En stabilitetsanalys av ett plan med en uppsättning tunnlar med dimensioner liknande Kärnbränsleförvarets deponeringstunnlar hade genomförts (Lönnqvist et al. 2010). Analysen hade gjorts med den tvådimensionella distinkta elementkoden Udec och för en rad olika antaganden om lastfall. Sammanfattningsvis visade analysen att förvaret inte kommer att fungera som ett svaghetsplan.

SSM såg positivt på SKB:s planer på fördjupade studier om magnitud, variabilitet samt osäkerhet av bergspänningarna vid olika djup och skalor som tar hänsyn till den termiska fasen, glaciationscykler och jordskalv. SSM noterade att SKB inte redovisar hur flertalet av de synpunkter som myndigheterna framförde kring jordskalv i granskningen av Fud-program 2007 har adresserats. I frågor om jordskalvs påverkan på slutförvaret hänvisar SKB enligt SSM till SR-Site, utan att närmare beskriva vad studierna har syftat till. Myndigheten delade därför Naturskyddsföreningen och Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskningens synpunkt att frågeställningar rörande risker med jordbävningar kopplade till storlek och frekvens sagnats i forskningsprogrammet. Eftersom myndigheten inte kunde bedöma underlaget till SR-Site upprepade myndigheten de förslag på studier som redovisades i granskningen av Fud-program 2007. SSM ansåg att SKB bör göra ytterligare utredningar om materialegenskaper om hållfasthet och styvhet hos stora sprickor, sprickzoner och förkastningar. SSM delade Uppsala universitets uppfattning att en kartläggning av de regionala strukturerna bör genomföras av SKB.

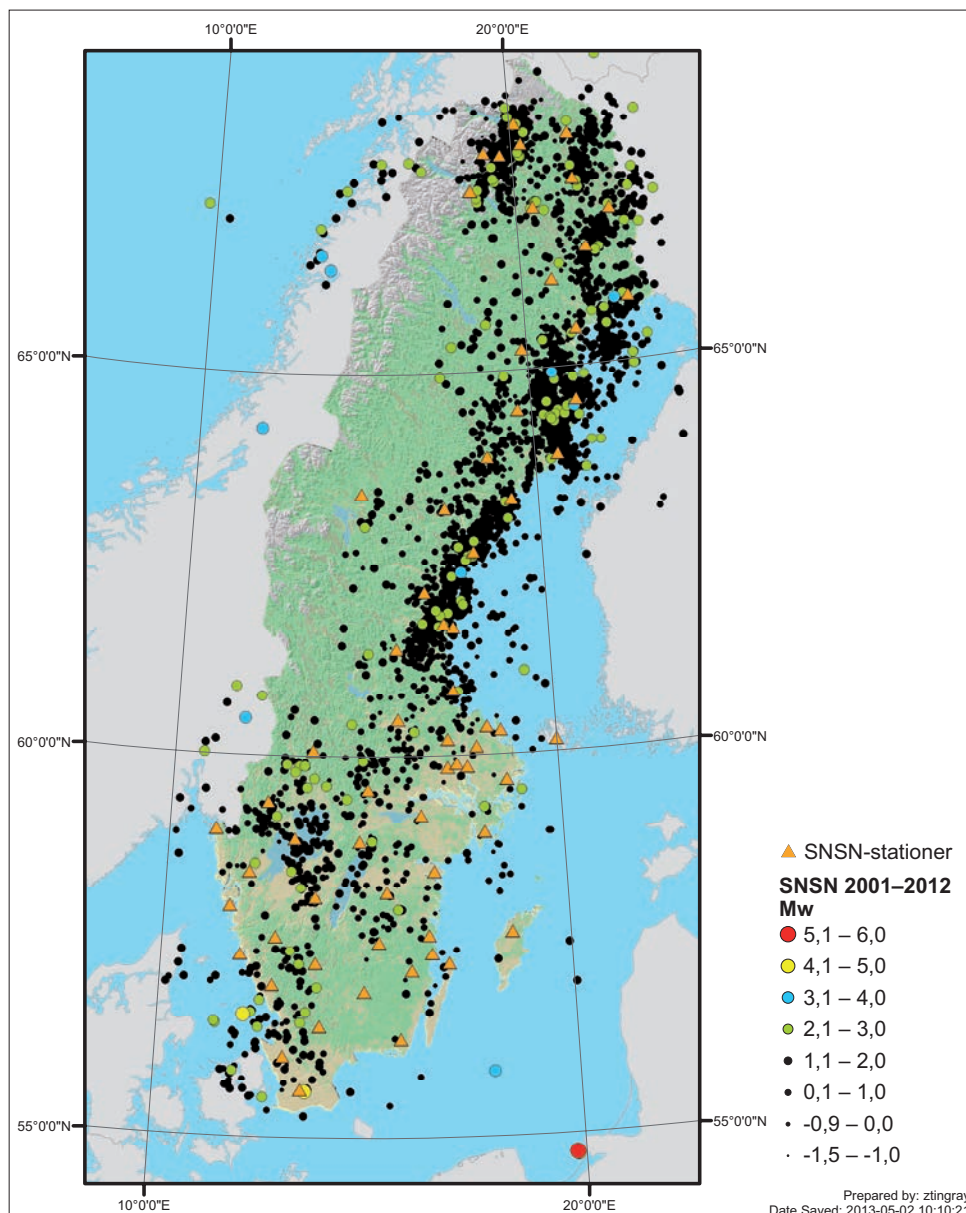
SSM ansåg vidare att SKB bör studera säkerhetsbetydelsen av upprepade skalv med små magnituder samt skalv större än magnitud sex. Därutöver ansåg SSM att SKB bör presentera vidare studier kring respektavstånd. SSM noterade även att SKB inte refererar till i sammanhanget relevanta studier som har genomförts, exempelvis om arbete med kriterier för val av deponeringspositioner (Munier 2010). SSM ansåg att SKB bör utreda sannolikheten för att sprickor, sprickzoner eller förkastningar som ligger utanför Forsmarkplatsen växer och tränger in i slutförvaret i samband med ett jordskalv eller den termiska fasen. I detta sammanhang bör även konsekvensen av heterogenitet i förkastningsegenskaper och spänningar beaktas. SSM ansåg att SKB ytterligare bör studera möjligheten att skilja mellan stabila och instabila förkastningar ur jordskalvssynpunkt. Därutöver ansåg myndigheten att SKB bör utreda om jordskalv av betydelse för förvarets säkerhet kan utlösas av spänningarna som uppstår i den termiska fasen.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

Inom ramen för detaljundersökningsprogrammet behandlas tektoniska och byggrelaterade aspekter av berget i kapselhåls- och deponeringstunnelskala, se avsnitt 14.4 Detaljundersökningar. För att ytterligare öka kunskapsläget om framtida jordskalv samt för att bättre kvantifiera kvarvarande osäkerheter har forskningsinsatser genomförts inom strukturgeologi, seismologi och tektonik.

Inom ramen för SR-Site, adresserades många av de synpunkter och frågeställningar som framfördes av SSM i samband med granskningen av Fud-program 2010. Exempelvis adresserades i Geosfärsrapporten (SKB 2010r, avsnitt 4.3) multipla skalv. Metodiken att beräkna antalet kritiskt positionerade kapslar som togs fram av Munier (2010) tillämpades i SR-Site och redovisades i huvudrapporten (SKB 2011e, avsnitt 10.4.5) jämte den ansats att skilja stabila från instabila zoner vilken redovisades i detalj i Fälth et al. (2010). Se även Program nedan.

Det svenska nationella seismiska nätet (SNSN) har sedan starten av det automatiska systemet 2002 registrerat, lokaliserat och beräknat fokalmekanismer för mer än 5 000 jordskalv, se figur 26-1. Skalven har magnituder mellan cirka -2 och 5,3 (Kaliningrad). Under 2008 instrumenterades den sista större utbyggnaden av nätet, i sydvästra Sverige, och sedan dess har SNSN en relativt god täckning i de seismiskt mest aktiva områdena av landet. I dag är stationsantalet uppe i 66. SKB har finansierat en betydande del av utbyggnaden av det nationella seismiska nätet. Sedan 2008 samlar SNSN kontinuerligt in data i realtid från samtliga stationer, vilket gör att mängden data för analys ökat signifikant jämfört med tidigare år då endast datasegment från detekterade händelser samlades in. Det nya förfinade seismiska nätet har på ett fundamentalt sätt förbättrat möjligheterna till tolkning av jordskalvsaktiviteten i Sverige.



Figur 26-1. Jordskalv registrerade med Svenska nationella seismiska nätet (SNSN) under åren 2001–2012 (M_w = momentmagnitud). Data från SNSN (till exempel Bödvarsson 2012).

SKB har nyligen initierat en tomografisk analys (se till exempel Tryggvason och Linde 2006), som ger en tredimensionell hastighetsmodell, och struktur, för Sverige samt nya lokaliseringar för jordskalven (se vidare under Program).

Uppskattningar av de spänningar som orsakade de stora postglaciala förkastningarna i norra Fennoskandia kräver kunskap om skalvplanens geometri. På Pärvieförkastningen har undersökningar av mikroskalv genomförts för att se om dessa definierar ett större skalvplan under tre kilometers djup. Seismiciteten på Pärvie är dock relativt låg, vilket gör analysen besvärlig (Lindblom 2011). Skellefteåområdet har den högsta seismiska aktiviteten i Sverige och skalven verkar ligga längs en av de två postglaciala förkastningar som identifierats där. Under 2012 genomfördes på SKB:s och SGU:s initiativ en sammanfattande exkursion i norra Sverige (en Exkursionsrapport är planerad).

Deformationsmätningarna med gps-teknik initierades i Forsmarksområdet 2005 och fortsätter. Målet med studien är att erhålla ytterligare erfarenheter av tekniken med fasta gps-stationer och kartlägga eventuella pågående berggrunds rörelser (främst horisontella) utmed de mest framträdande regionala deformationszonerna, Singözonen och Forsmarkszonen. Data har analyserats i omgångar och arbete pågår med att sammanfatta erfarenheterna med denna teknik (Ekman et al. 2013).

Program

Någon samlad analys av det svenska nationella seismiska nätets data har ännu inte gjorts i stor skala. Det finns nu data så att en utvärdering som bygger på samtidig analys av större mängder skalv kan bli gjord. Sveriges jordskorpa är inte homogen, utan de seismiska hastigheterna varierar kraftigt inom Sverige. Det är sannolikt att jordskalven i fråga om djupfördelning och jordskalvmekanismer skiljer sig åt mellan olika regioner. En samlad analys av de svenska skalven, även innefattande den seismiska hastighetsfördelningen i jordskorpan, skulle kunna öka förståelsen av spänningsuppbyggnaden i den svenska berggrunden. SKB har för avsikt att genomföra ett antal delprojekt kopplade till det nationella seismiska nätet enligt följande:

Tredimensionell struktur och omlokalisering av svenska skalv: Till hastighetsbestämningen används både jordskalv och seismiska händelser orsakade av sprängningar, dessa ger en mer homogen geografisk fördelning över Sverige. Den tomografiska analysen (till exempel Tryggvason och Linde 2006) ska ge en tredimensionell hastighetsmodell, och struktur, för Sverige samt nya lokaliseringar för jordskalven. Större skalv med god stationstäckning används för kompletterande studier av djupet med hjälp av så kallade djupfaser. Jordskalv i områden med många skalv omlokaliseras med relativa metoder för högsta möjliga upplösning av strukturer. Skalven jämförs med geologiska strukturer och geofysiska data i form av magnet- och tyngdkraftskartor.

Svenska fokalmekanismer och jordskalvshärledda spänningar i Sverige: För de omlokaliserade skalven enligt ovan beräknas nya fokalmekanismer. Skalv med väl bestämda mekanismer inkluderas i beräkningar av de spänningar som orsakade skalven, se exempelvis (Rögnvaldsson och Slunga 1993, Keiding et al. 2009). Även här jämförs skalvmekanismerna med geologiska strukturer och geofysiska data. Spänningarna relateras till andra data, till exempel mätningar i borrhål och geologiska indikatorer. Spänningarna jämförs också med modeller av spänningstillståndet i inre delar av tektoniska plattor. Studien förväntas ge en signifikant ökning av antalet väl bestämda observationer av spänningarna på djupet i den svenska jordskorpan.

Sammantaget förväntas ovanstående projekt öka kunskapen om aktiva strukturer i jordskorpan, de jordskalvsgenererande mekanismerna samt spänningsfältet i den svenska jordskorpan.

Studie av postglaciala skalv i Skellefteåtrakten: Geometrin och jordskalvsaktiviteten på en av de svenska glacialt inducerade förkastningarna, Pärvie, har studerats i detalj (till exempel Lindblom 2011). Tyvärr var inte skalvaktiviteten under projektets mätperiod sådan att några definitiva slutsatser kunde dras om hela förkastningens geometri. I Skellefteåområdet finns emellertid två glacialt inducerade förkastningar och området uppvisar den högsta skalvaktiviteten i Sverige, se figur 26-1. Reflektionsseismiska undersökningar (Juhlin och Lund 2011) visar att den så kallade Burträskförkastningen lutar brant och eventuellt har en parallellförkastning på djupet. Erfarenheterna av skalvanalysen på Pärvieförkastningen (Lindblom 2011) visar dock att ännu fler stationer krävs för att så många som möjligt av de mindre skalven ska kunna analyseras. Sex temporära och fyra permanenta seismiska stationer är nu (2013) etablerade i området. Projektet förväntas fördjupa kunskaperna om glaciala förkastningar, deras geometri och nuvarande aktivitet samt möjligheterna att med hjälp av de spänningsförhållanden som i dag råder vid förkastningarna kunna göra bättre modeller av de förhållanden som rådde då de stora skalven skedde.

Metodutveckling om efterskalvsstudier: De stora skalven på Island 2000 och 2008, med magnituder mellan 6,3 och 6,5, orsakade mängder av efterskalv. Det isländska seismiska nätet registrerade närmare 1 800 efterskalv under det första dygnet efter skalvet den 17 juni 2000. Efterskalven fortsatte sedan under flera år. De övriga skalven med magnituder större än 6 har orsakat liknande sekvenser. Kvaliteten på bestämningen av efterskalvens fokalmekanismer varierar med antalet stationer som registrerade skalven. Dessa data kan användas för att studera skalvaktivitetens läge och intensitet (se till exempel Lindman et al. 2010) samt vilka sprickor som aktiverats och storleksfördelningen av förskjutningarna. I avsikt att utveckla jordskalvsmodellering (se till exempel Fälth et al. 2010) är målet att initiera en metodstudie med efterskalvsanalys för data från Island.

Lokalt seismiskt nät i Forsmark: Som en del av SKB:s forskningsarbete kring naturlig och inducerad seismicitet förbereder SKB en installation av ett lokalt, mikroseismiskt nät i Forsmark (se avsnitt 14.4.2 Undersökningar och modellering).

Vidareutveckling av jordskalvsmodellering: Den modelleringsteknik som beskrivs i Fälth et al. (2010) kommer att tillämpas på Forsmark med platsspecifika in situ-spänningar, glacialsänningar och platsspecifik strukturgeologi, det vill säga geometri hos deformationszoner och sprickor i deponeringsområdena. Ett doktorandprojekt har också initierats med den allmänna målsättningen att vidareutveckla och validera den metodik för numerisk simulering av jordskalv som beskrivs i Fälth et al. (2010) och att utveckla kopplingen mellan den numeriska modelleringstekniken och den seismologiska/geofysiska vetenskapen. Exempel på punkter/frågeställningar som avses att bli beaktade är: betydelsen av förkastningens vidd (tjocklek, med eller utan "damage zone") och geometri; betydelsen av hållfasthetsegenskapernas variation över förkastningsplanet; tekniker för att simulera spontanutveckling av brottet (i motsats till den programmerade spridning som använts till dags dato); betydelsen av hur förkastningens kanter (avslutning mot omgivande berg) modelleras och krav på (och omfattning av) det empiriska jämförelseunderlaget (se även efterskalvsstudier som beskrivs ovan).

Skjuvrörelser hos stora sprickor och eventuell propagering: I de numeriska studier och analytiska betraktelser som gjorts för säkerhetsanalysen SR-Site (Fälth et al. 2010, Hökmark et al. 2010) är den maximala skjuvrörelsen hos en spricka direkt proportionell mot sprickans storlek (radie). Skjuvrörelsen hos en stor spricka blir därför per definition stor. Konsekvenserna av de pessimistiska antaganden som gjorts i analysen innebär ett överdrivet bortfall av deponeringshål och en mindre effektiv användning av den tillgängliga deponeringsvolymen. Vidare överskattas antalet kapslar som kan komma att skadas i samband med skalv. För att minska konservatismen i våra prognoser, har ett doktorandprojekt initierats med målet att få en bättre förståelse för hur en mer realistisk beskrivning av stora bergsprickor, med hänsyn till hållfasthetsegenskapernas skalberoende och fördelning över sprickytan samt sprickytans geometri, påverkar skjuvrörelserna i modellerna. En ytterligare frågeställning är om de spänningskoncentrationer som byggs upp vid sprickans kanter under skjuvning kan leda till propagering av sprickan och på vilket sätt detta påverkar den totala skjuvrörelsen.

I Sverige pågår olika initiativ inom ett kontinentalborrningsprogram (the Swedish Deep Drilling Program, SDDP). Vetenskapsrådet har beviljat medel för anskaffning av en borrhög med möjligheten att kunna genomföra olika typer av vetenskapliga undersökningar av förhållanden ned till cirka tre kilometer i det Fennoskandiska sköldområdet. Borrhögen är nu anskaffad och förvaltas av Lunds universitet. Flera borrhögprojekt för riggen är i planeringsfas och de berör bland annat strukturgeologi, seismologi och tektonik, men även hydrogeologiska, termiska och hydrogeokemiska aktiviteter är planerade. Exempelvis kommer borrhögningar i Åretrakten inom ramen för projektet COSC, Collisional Orogeny in the Scandinavian Caledonides (SDDP 2013a), enligt plan att initieras under 2013. SKB är engagerat i SDDP i tillämpliga delar när det gäller allmän geovetenskaplig kunskapsuppbyggnad av förhållandena i det svenska urberget. Vidare har SKB engagerat sig i förberedelsearbetet att borra undersökningshål genom glacialt inducerade förkastningar inom ramen för det så kallade Dafneprojektet (SDDP 2013b).

Lidar: Lantmäteriet har sedan 2009 arbetat med att laserskanna Sverige med ambitionen att fram till 2015 framställa en rikstäckande höjdmodell med ett medelfel i höjd som är bättre än 0,5 meter för ett 2 meter grid (se exempelvis Petersen och Rost 2011). Medan detta Fud-program skrivs, har större delar av landet skannats och digitala elevationsmodeller har tagits fram för cirka 75 procent av Sveriges yta (Lysell 2013). Jämfört med tidigare tekniker för att ta fram digitala elevationsmodeller erbjuder laserskanning avsevärt förbättrade möjligheter att detektera topografiska lineament. Redan i nuläget har preliminära studier visat att de tidigare karterade glacialt inducerade förkastningarna uppvisar en mer komplex geometri än vad som tidigare varit känt. Vidare har en stor mängd nya topografiska lineament kunnat detekteras. Det är möjligt att en del av dessa är uttryck för glacialt inducerad förkastningstektonik och SKB avser därför att bevaka utvecklingen inom detta område som en del i det fortlöpande arbetet med seismologi kopplat till långsiktig säkerhet.

26.9 Sprickbildning

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 redovisade SKB sin verksamhet som behandlat egenskaper i och säkerhetsanalytiska aspekter på den störda zonen (EDZ). SKB:s engagemang hade framför allt skett inom ramen för det internationella programmet Decovalex 2011 och ett riktat program med flera delprojekt, Zuse (Störda zonens mekaniska och hydrauliska egenskaper) (Bäckblom 2008, Olsson et al. 2008, 2009, Ericsson et al. 2009, Hudson et al. 2009, Christiansson et al. 2009, Neretnieks och Andersson 2009, Glamheden och Hökmark 2010).

SSM såg positivt på SKB:s planer att utvärdera försöken i de delar av Prototypförvaret som då var tänkta att öppnas. SSM framförde ytterligare synpunkter kring brytningen av långtidsförsök. SSM:s synpunkter kring det fortsatta arbetet med den störda zonen återfinns i avsnitt 14.5.2 Berguttag. SSM framförde även synpunkter kring behov att ytterligare studier kring sprickbildning.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

Mätdata (akustisk emissionsdata, spänningsmätningar, termiska data) från Prototypförvaret i Äspö-laboratoriet vilket öppnades 2011 har utvärderats tillsammans med resultat från termo-mekaniska beräkningar för att undersöka i vilken omfattning sprickpropagering kan ske kring ett deponeringshål. Slutsatserna från utvärderingen är att man från beräkningsresultaten inte borde behöva räkna med någon sprickbildning. De beräknade rörelserna utefter existerande sprickor är små och huvudsakligen elastiska och ger därför inte upphov till kritiska spänningskoncentrationer i sprickränderna. Att rörelserna är små beror i sin tur dels på att sprickorna är små, dels på att termospanningarna är betydande bara på de delar av sprickplanen som ligger nära tunneln och kapselhålen. De akustiska emissioner som inte direkt kan kopplas till spänningskoncentrationer i väggarna i deponeringshål tycks inte kunna kopplas till något sprickplan. Det finns alltså inga observationer som motsäger beräkningsresultaten (se även avsnitt 13.11 Prototypförvar, underavsnitt Resultat).

Program

Ett forskningsprogram har initierats i samarbete med University of Alberta för att utveckla en syntetisk bergmassa för kristallina bergarter och utifrån denna syntetiska bergmassa (SRM) modellera hållfasthetsegenskaper. Förutsättningarna för att använda SRM-metodiken för att förutsäga bergmassans långsiktiga hållfasthet inom tidsramen en miljon år ska studeras. Två alternativ kommer att undersökas för att simulera intakta kristallina bergarter: (i) cirkulära kärnor och (ii) månghörniga korn (så kallad Voronoi tessellation). Forskningen ska utveckla en strategi för att generera månghörniga korn, som efterliknar kornstorleksfördelningen och den statistiska egenskapsfördelningen i intakt berg och dess korngränser. Programmet ska utreda hur man lämpligast knyter ihop kornen på ett logiskt sätt för att kunna imitera det intakta bergets mikrostruktur. Programmet avser även att fastställa inverkan av materialets egenskaper förknippade med korn och kornfogar på det intakta bergets beteende.

Preliminära resultat baserat på modellering av Äspö Pelarstabilitetsförsök (Lan et al. 2013) visade på lovande möjlighet att belysa betydelsen av heterogenitet i mineralkornsskala på brottutvecklingen. Den tvådimensionella modelleringen av Pelarstabilitetsförsöket föreslår att initieringen av brott i kristallint berg börjar med mikrostrukturella brott (i mineralkornsskala) och att heterogeniteten i den skalan har betydelse för brottets utveckling, som i hög grad initieras som dragbrott mellan mineralkorn. De inducerade sprickorna leder till omdistribuering av spänningsfältet i mineralkornsskala i takt med att brottet propagerar. En av de frågor som avses studeras närmare är brottkriterier som gäller för korngränser och gränssnitt. Sprödbrott kan inte representeras av traditionella Mohr Coulomb-skjuvbrottkriterier. Inom detta arbete utreds om detta även gäller för de små korn som använts i ett så kallat GBM-koncept (Grain-Based Model). Ytterligare en fråga som måste lösas är effekten av kornstorleksfördelning på GBM och hantering av den uppskalning som behövs för att få realistiskt hanterbara modeller.

Avsikten är även att med hjälp av den syntetiska bergmassan studera hur man kan länka GSI-metoden (Geological Strength Index) till typiska sprickfrekvenser (baserat på DFN-modeller) i kristallint berg. Se avsnitt 14.5.2 Berguttag för program rörande EDZ.

26.10 Tidsberoende deformationer

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 presenterades en samordnad utredning som behandlar mikrosprickors uppträdande, subkritisk sprickbildning och krypning (Damjanac och Fairhurst 2010). Utredningsarbetet var baserat på tolkning av resultat från korttidsprovning av krypning i bergprover, numeriska modellanalyser av effekten av minskad sprickråhet på grund av spänningsskorrosion av bergets hållfasthet samt belägg från plattetektoniska processer och observationer av bergspänningar i bergtäkter. Publikationens slutsatser var sammanfattningsvis att en spänningströskel existerar för kristallina bergarter (40–60 procent av enaxlig tryckhållfasthet). Vidare var en slutsats att en exponentiell extrapolation av korttidsstesters resultat för krypning innebär en realistisk tidsberoende hållfasthet motsvarande en flytande spänningsrelation (från engelskans Driving Stress Ratio) av cirka 0,45. Detta innebär att en linjär extrapolation till en slutgiltig nollhållfasthet är obefogad (Potyondy 2007).

SSM såg positivt på att SKB har utrett mycket långsiktiga processer för bergets hållfasthetsutveckling. SSM ansåg dock att SKB även bör studera dynamiska processer hos sprickor och förkastningar som utlöses under mycket korta tidsperioder och vid överskridandet av materialens hållfasthet, exempelvis vid jordskalv. I detta sammanhang bör även temperaturpåverkan beaktas. SSM ansåg vidare att SKB bör genomföra studier som bekräftar att tidsberoende spricktillväxt inte påverkar stabiliteten och vattengenomsläppligheten i slutförvarets närområde under förvarets olika faser. I sådana studier bör SKB ta hänsyn till spänningsskorrosion vid sprickändar i alla belastningsfall (drag, skjuvning, rivning) i och med att spricktillväxten inte bara sker under drag men även under skjuvning eller rivning vid starkt inspända förhållanden (Backers 2005, Backers och Stephansson 2012).

Nyvetenskap sedan Fud 2010

För utveckling av transient bergmekanisk modellering hänvisas till avsnitt 26.24.2 Integrerad modellering – termo-hydro-mekanisk utveckling.

Program

För utveckling av transient bergmekanisk modellering hänvisas till avsnitt 26.24.2 Integrerad modellering – termo-hydro-mekanisk utveckling. Vissa av dessa frågeställningar hanteras även i avsnitt 26.8 Reaktivering – rörelse längs befintliga sprickor.

26.11 Advektion/blandning – grundvattenkemi

I detta avsnitt behandlas effekten av den blandning som uppstår genom att vattnet rör sig med varierande hastighet i bergets spricksystem och hur den processen påverkar grundvattenkemin. I avsnitt 26.12 behandlas betydelsen av advektion och dispersion för radionuklidtransport.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 konstaterades att M3-koden hade färdigdokumenterats. Blandningsmodellen hade använts i de platsbeskrivande modellerna och advektionsberäkningar hade applicerats inom SR-Can. Man planerade dessutom att påbörja en förbättring av metodiken för att studera förändringar i vattenkemin nära en tunnel i Äspölaboratoriet.

SSM ansåg att studierna i öppna tunnlar var angelägna, särskilt för att studera möjligheten till närvaro av syre i omättade zoner i det tunnlnära berget.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Modeller som inkluderar advektion och blandning, kopplade med kemiska reaktioner, har använts i säkerhetsanalysen SR-Site (Salas et al. 2010). I de remissvar som kommit till SSM i samband med granskningen, har externa granskare dock ansett att omfattningen och osäkerheterna av den kemiska modellen inte har varit tillräckligt väl studerad (Bath 2012, McMurry och Bertetti 2012).

Förändringar i grundvattenkemin orsakade av en tunnel har utvärderats. Mätningarna, som spänner över en 25-årsperiod från både SFR (Nilsson A-C et al. 2010, 2011) och Äspölaboratoriet (Mathurin et al. 2012), har kunnat visa på stora skillnader mellan platserna. Exempelvis skiljer sig nedträngningen av modernt Östersjövatten beroende på de vattenförande strukturernas orientering och egenskaper.

Utvecklingen av en metodik för så kallad passiv provtagning av lösta metaller har initierats och pågår i Äspölaboratoriet. Principen bygger på adsorption av lösta metaller med en gel i en trycksatt provkammare. Fokus på provtagningen är sällsynta jordartsmetaller för att kunna göra jämförelser av analogerna europium och gadolinium med aktiniderna americium(III) och curium(III).

Utrustning för att utföra onlinemätningar av parametrarna pH, Eh, temperatur, elektrisk konduktivitet samt löst syrgas håller på att utvecklas vid Äspölaboratoriet. Systemet kommer att kontinuerligt kunna registrera förändringar av nämnda parametrar över tid och övervakas via dator. Resultaten från mätningarna beräknas ge viktig information och input till konstruktion av utrustning för grundvattenprovtagning i manschetterade borrhål under jord i samband med Kärnbränsleförvarets utbyggnad.

Program

Moniteringsprogrammen i Forsmark och på Äspö kommer att fortsätta. Utrustningen för onlinemätningar kommer att fortsätta att utvärderas och utvecklas vid Äspölaboratoriet. Planeringen av detaljundersökningarna av Forsmark beskrivs i avsnitt 14.4 Detaljundersökningar. Utveckling av numeriska modeller beskrivs nedan i avsnitt 26.24.3 Integrerad modellering – hydrogeokemisk utveckling.

26.12 Advektion/dispersion – radionuklidtransport

SKB:s forskningsinsatser kring advektion och dispersion rör i första hand kanalströmning inom enskilda sprickor och spricknätverk, samt andra mekanismer som kan bidra till storskalig spridning av en föroreningsplym.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SSM ansåg att det är positivt att SKB arbetar vidare med förståelsen och hanteringen av kanalbildning. Likaså ansåg myndigheten att det är positivt att SKB vill utreda och stämma av användningen av porositetsbegreppet inom olika områden.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

En målmedveten och grundläggande modelleringsinsats har gjorts för att öka förståelsen av kanalbildning i enskilda sprickor. En av de stora utmaningarna i denna typ av simuleringar är att lösa flödesproblemet med hög noggrannhet då stora skillnader i apertur föreligger mellan olika delar av sprickplanet. En ny metodik, baserad på så kallade Fup-basfunktioner har använts för att lösa strömningssproblemet med hög noggrannhet. Fup-basfunktioner är en numerisk metodik för att beskriva olika signaler, funktioner, material och/eller lösningar till differentialekvationer med en adaptiv, multi-upplösning av alla rums- och tidsskalor med given noggrannhet. De två första publikationerna kommer under 2013 och redovisar resultaten för olika antaganden om aperturfördelning och samband mellan apertur och transmissivitet. Resultaten indikerar att högre aperturvariabilitet kan leda till antingen opåverkad, lägre, eller högre flödesrelaterat transportmotstånd (F-faktor) beroende på om den underliggande aperturvariabiliteten är multi-gaussisk, starkt konnekterad icke-gaussisk (hög konnektion mellan områden med stor apertur), eller okonnekterad icke-gaussisk (hög konnektion mellan områden med liten apertur). Detta resultat indikerar svårigheterna att hitta en generell korrektionsfaktor för kanalbildning. En statistisk metod för att definiera en reduktionsfaktor för given aperturvariabilitet förslås i en av de kommande publikationerna.

Det noteras att den enligt Fud-program 2010 planerade applikationen med Navier-Stokes-lösaren i DarcyTools inte har använts i detta projekt då Fup-metodologin visade sig vara ett bättre alternativ. En ytterligare studie är genomförd där advektiv transport och dispersion i konduktivitetfält som avviker från multi-gaussisk normalfördelning studerats med hjälp av semianalytisk transportmodell-

lering (Fiori et al. 2010). Studien indikerar att dispersionen ökar om den rumsliga korrelationen i lågpermeabla zoner ökar, medan dispersionen minskar om korrelationen ökar i högpermeabla zoner. Detta resultat indikerar att strukturella geologiska skillnader har stor påverkan på resulterande transportkaraktistik.

Ett från SKB fristående forskningsarbete (Larsson 2012) om kanalbildning i sprickor och spricknätverk har utförts som ett doktorandprojekt vid Uppsala universitet. Resultaten som Larsson (2012) kommer fram till stödjer resultaten som kommer att redovisas under 2013. Larsson (2012) undersöker dock bara en delmängd av de olika variabilitetsstrukturerna som redovisas i SKB-studien, men applicerar den presenterade metodiken inte enbart för enskilda sprickor utan även för spricknätverk.

I Fud-program 2010 diskuterades ett möjligt porositetsprojekt med syfte att reda ut olika porositetsbegrepp och använda definitioner. Detta projekt har blivit försenat och planeras nu att genomföras under kommande treårsperiod eller eventuellt under nästkommande treårsperiod.

Program

De numeriska simuleringarna med Fup-tekniken fortsätter. Under kommande Fud-period kommer specifikt ett projekt motsvarande det som presenterades ovan att göras, men i stället för att analysera enskilda partikeltrajektorer så ska ett strömröregreppssätt användas. Denna studie ger därmed kompletterande information kring hur det flödesrelaterade transportmotståndet ska formuleras och eventuellt reduceras i säkerhetsanalytiska applikationer där grundvattenströmning typiskt simuleras i sprickor med homogen apertur.

En studie ska genomföras för att studera om kanalbildning, specifikt kanalernas bredd och frekvens mellan kanaler, kan uppskattas på tunnelväggar. Hypotesen är att man med hjälp av infraröd fotografiering kan uppskatta den till synes torra ytans temperatur. Kanaler som strömmar ut på tunnelväggen, med i princip flöden som är osynliga för ögat då vattnet avdunstar, kommer att leda till en temperatursänkning på väggen. Från temperaturdata kan man då eventuellt identifiera hur stora områden som är kylda och hur många kanaler som finns per ytenhet. Denna studie kopplar mot och kan ge viktig information för DFN-R-projektet som beskrivs i avsnitt 26.24.1 DFN.

26.13 Diffusion – grundvattenkemi

Detta avsnitt handlar om effekter av molekylär diffusion av grundvattenkomponenter. Betydelsen av denna process för nuklidtransport behandlas i nästa avsnitt. Diffusion av grundvattnets gaskomponenter redovisas i avsnitt 26.21 Gasbildning/gaslösning.

Interaktionen mellan bergmatrisens porvatten och grundvattnet i sprickorna sker huvudsakligen genom diffusion. Kemiska reaktioner sker framför allt med sprickfyllnadsmineral, även om reaktioner med bergmatrisens primära mineral på lång sikt kan få en ökad betydelse för grundvattnets kemi.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

De utförda undersökningarna på borrhävar från Forsmark och Laxemar visade att komponenter av vatten med vitt skilda åldrar och ursprung finns representerade i matrisen: glaciala smältvatten, postglacialt havsvatten samt meteoriskt vatten från ett varmare klimat som härrör från tiden före den senaste nedisningen. Resultaten visade också att matrisdiffusion sker över sträckor om flera tiotals meter. Det fanns inget i resultaten som indikerade att matrisporvattnet skulle ha extremt höga salthalter, vilket, om så skulle vara fallet, skulle kunna ha negativ påverkan på egenskaperna hos konstruktions- eller återfyllningsmaterial.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Förbättringar har gjorts med avseende på den analytiska kvaliteten i diffusionsexperimenten för både konservativa (brom, klor, delta-deuterium och delta-syre-18) och icke-konservativa komponenter (med korrektioner för eventuella reaktioner med mineral). Detta stärker förtroendet för användningen av till exempel magnesium som en indikator på vatten med marint ursprung.

Tekniken med diffusiv isotopjämvikt har använts för att analysera porvattnets stabila isotoper och resultaten stämmer med gängse kunskap. För närvarande kan man inte utesluta möjligheten att dessa resultat är påverkade av fraktioneringseffekter och/eller att inte all fukt eller allt vatten från bergprovet har extraherats helt. Pålitliga värden för stabila isotoper är av vikt för att ange porvattnets ursprung. Ytterligare analytiska studier krävs för att öka förtroendet för tolkningen av dessa porvatten.

Program

Laboratorieförsök (till exempel av anjonuteslutning eller studier av elektrisk genommigration) planeras för att jämföra med resultaten från utdiffusionsexperiment som har utförts med kloridjoner och för att jämföra olika metoder för porvattenextraktion. Möjligheten att utföra dessa försök i samarbete med Posiva kommer att utvärderas. För att öka konfidensen planeras analyser på flera laboratorier. Se också programmet som beskrivs i nästa avsnitt, 26.14.

26.14 Diffusion – radionuklidtransport

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Inför Fud-program 2010 hade studier genomförts för att utvärdera osäkerheter associerade med den elektriska resistivitetsmetoden för mätning av formationsfaktorn. Även långtidsförsöket LTDE-SD hade genomförts på förvaringsdjup för att bestämma diffusions och sorptionsegenskaper in situ. Flera små provkärnor hade tagits och penetrationsdjup hade uppmätts.

SSM såg positivt på att SKB har genomfört en studie för att utvärdera de osäkerheter som finns associerade med den elektriska resistivitetsmetoden för mätning av formationsfaktorn. SSM saknade dock formationsfaktorer under 10^{-5} i utvärderingen.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

I platsundersökningarna har mätningar av matrisdiffusivitet utförts både under atmosfäriskt tryck i laboratorium och även in situ med hjälp av elektriska metoder. En statistisk analys av data pekar på att prov som tas till laboratoriet är störda (SKB 2010q, r). Störningen beror rimligen på att proven tas från dess naturliga inspända tillstånd, samt att borrning och annan provhantering ger upphov till mekanisk störning. I medeltal är matrisdiffusiviteter erhållna i laboratoriet en tiopotens högre än dem erhållna in situ. Detta pekar på att upp till 90 procent av den transportkapacitet som man ser i laboratoriet kan vara inducerad, vilket skulle innebära att laboratoriemätningar inte är lämpliga för att undersöka naturlig variabilitet (de är dock fortfarande ovärderliga för att undersöka processer). Detta ställer i sin tur högre krav på de elektriska in situ-mätningarna, vilket kan betyda att vidare validering och metodutveckling är nödvändig.

Det ställer även krav på att bättre kunna utvärdera processer som är förknippade med en elektrisk potentialgradient, men inte nödvändigtvis med en koncentrationsgradient. Ytkonduktivitet är en sådan process, liksom frekvensberoende (Löfgren et al. 2009). Möjligen kan anjonexklusion och andra processer påverkas på ett annat sätt av ett elektriskt fält än av ett koncentrationsfält. De elektriska in situ-mätningarna har även använts för att motivera antagandet om storskalig porkonnektivitet (SKB 2010q, r). De har vidare använts i en ny metod för att utvärdera den volymetriska sprickaperturen för flödande sprickor kopplade till PFL-anomalier (Posiva Flow Log) (SKB 2010q). Nyligen har en utvärdering av bergets in situ-matrisdiffusivitet gjorts för bergvolymen som omger SFR, i paritet med dem som tidigare gjorts vid platsundersökningarna i Forsmark och Oskarshamn.

Under föregående period har diffusions- och sorptionsexperimentet LTDE-SD formellt slutförts och avrapporterats (Widstrand 2010a, b, Nilsson K et al. 2010). En intressant observation är att penetrationsprofilerna inte kan förklaras med enkla endimensionella diffusionsmodeller. Om detta är en artefakt av experimentuppsättningen eller visar på en inneboende egenskap i berget återstår att utvärdera. Det har föreslagits att en bättre passning kan åstadkommas om man modellerar bergmatrisen som ett heterogent medium. En sådan modellering skulle kräva indata i form av en utökad parameterisering av bergmatrisen. Data och rön från det pågående finska programmet Repro, Rock Matrix Retention Properties (Aalto et al. 2009), kan vara användbara för modellering inom till exempel Task Force för grundvattenflödes- och transportmodellering (se avsnitt 26.4.5).

En studie som visar att geogaser, helium, metan, radon med flera, diffunderar genom matrisen med den hastighet och det flöde som transportmodellerna predikterar, har blivit publicerad (Neretnieks 2013). Analysen baseras på data ned till 1 000 meter från Forsmark, Laxemar och Olkiluoto, samt en mängd andra observationer och mätningar. Den teoretiska transportmodellen som tagits fram i denna studie har använts i modifierad form för att visa att K_d för radium som använts i SR-Site (Crawford 2010) är konsistent med uppmätta naturliga radon-222- och radium-226-aktiviteter i Forsmarks grundvatten.

En annan studie som pågår visar på att matrisdiffusion har en inverkan på spänningsinducerad mineralupplösning och återutfällning. Detta kan i sin tur möjligen ha inverkan på de sprickor som bildas på grund av spjälkning kring deponeringshål, då de blir sammanpressade av den svällande bentoniten. Särskilt vid förhöjd temperatur kan de krympa ihop på grund av upplösning på trycksidan och utfällning i omgivande porös bergmatris.

En analytisk lösning för diffusion in i stagnanta zoner, följt av diffusion in i en bergmatris bestående av flera matrislager, har tagits fram (Mahmoudzadeh et al. 2012).

Metoder baserade på elektromigration har visat på lovande resultat (Löfgren och Neretnieks 2006, Löfgren et al. 2009, Vecernik et al. 2012). Metoden möjliggör mätningar över längre diffusionsavstånd än traditionella metoder.

Program

Den analytiska lösning för diffusion in i stagnanta zoner, följt av diffusion in i en bergmatris med flera mineralager, som har tagits fram (Mahmoudzadeh et al. 2012) avses att implementeras i Chan3D. Vidare måste metoder utvecklas för att mäta kanalvidder. Denna storhet är central för att bedöma stagnanta zoners betydelse. Förslag på hur denna storhet kan uppskattas finns, baserad på avdunstning mätt med infraröd kamera, se avsnitt 26.12 Advektion/dispersion – radionuklidtransport.

Ett modelleringsprojekt planeras för att studera de konceptuella antagandena bakom den matrisdiffusionsmodell, som traditionellt används både i säkerhetsanalysen och i utvärdering av experiment. Modellen säger att grundvattenströmning sker i öppna sprickor, medan diffusion in i matrisens immobilisera vatten sker enligt en endimensionell modell med oftast homogena egenskaper. I själva verket genomskärs dock matrisen av mikrosprickor som är mer eller mindre vattenförande. I projektet ska sprickorna i matrisen inkluderas och diskretiseras tillräckligt fint så att även möjligt flöde i matrisen går att simulera. Syftet är att se om en enkel advektions-diffusionsmodell kan reproducera den modellerade transportprocessen, eller om mer komplicerade modeller behövs. Beräkningarna ska stödjas av röntgentomografimätningar av bergmaterial från Forsmark i syfte att identifiera relevant storlek hos mikrosprickorna.

Metoder baserade på elektromigration har visat på lovande resultat (Löfgren och Neretnieks 2006, Löfgren et al. 2009, Vecernik et al. 2012). Parallellt med utveckling av metoden och tillämpningar i laboratoriemiljö, bedöms det att det finns potential att kunna utveckla denna metod för tillämpning i fält.

Det kan noteras att den planerade enklare uppsättningen av LTDE-SD (LTDE Light) som diskuteras i Fud-program 2010 inte har förverkligats. Detaljundersökningsprogrammet (se avsnitt 14.4 Detaljundersökningar) kommer att initiera detta projekt så att resultat finns framme i tid för etablering av experimentet då bygget av Kärnbränsleförvaret kommit i gång.

26.15 Reaktionen med berget – grundvattenkemi

Reaktioner mellan berget, i synnerhet sprickmineralen, och grundvattnet är en ständigt pågående process, om än med mycket variabel intensitet och omfattning. Den största mängden sprickmineral har bildats under hydrotermala förhållanden (och är alltså äldre än 400 miljoner år), men även lågtemperaturmineral, till exempel kalcit, pyrit och närmare markytan järn-oxyhydroxider och mangan(oxyhydr)oxider, förekommer. Dessa kan utnyttjas för att förstå grundvattnets utveckling, när det gäller till exempel redoxförhållanden och mikrobiell aktivitet. Reaktioner med bergmatrisens mineral sker i begränsad omfattning och processerna i lågtemperaturmiljö är långsamma. På lång sikt kan dock dessa reaktioner med bergmatrisens primära mineral få en ökad betydelse för grundvattnets kemi.

Redoxreaktioner är viktiga för att bedöma den långsiktiga säkerheten för slutförvar, både för använt bränsle och för låg- och medelaktiv avfall. Oxiderande förhållanden på förvarsdjup kan delas upp i två delproblem:

- Förvaret kommer att vara syresatt under bygge och drift. En del syre kommer alltså sannolikt att vara kvar i förvaret och dess närhet efter förslutningen.
- Syresatt grundvatten skulle kunna tränga ned till förvarsdjup under perioder med kraftigt förändrade hydrogeologiska betingelser, exempelvis i samband med en glaciation.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Inför Fud-program 2010 hade en hel del studier av sprickfyllnadsmineral utförts i Laxemar, Äspö och Forsmark. Studierna av redoxfronten i de övre delarna av berget i Laxemar och Äspö, liksom av rödfärgning av sidoberget, visade på stabila anoxiska förhållanden vid förvarsdjup och att syre konsumeras i de övre 150 meterna i berget, om inte redan i jordlagret. Dessa studier baserades på mineral- och elementfördelningar, och de har kompletterats med uranserieanalyser vilka har bidragit till att detektera processer som är geologiskt sena, det vill säga sådana som varit aktiva under och efter den senaste istiden. SSM såg positivt på de fältmätningar som hade utförts, men påpekade behovet av kompletterande matematiska modeller.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

En av de frågor som ständigt dyker upp är hur långt ner i berget oxiderande förhållanden kan ses som resultat av nedträngning av glacialt smältvatten. Därför testades samma metodik som använts vid analys av borrhävar från Laxemar och Äspö (Tullborg et al. 2008, Drake et al. 2009) på borrhävarprover från Grönlandsprojektet (se avsnitt 19.7 Greenland Analogue Project). Alla analyser och tolkningar är inte klara än, men resultaten från borrhävarna DH-GAP-01 och DH-GAP-03 indikerar att övergången från oxiderande till reducerande förhållanden även här sker inom de översta 150 meterna. Resultaten från uranserieanalyser (Uranium Series Disequilibrium, USD) indikerar att den oxidation som noteras i mineralen sannolikt inte skett under Holocen, utan antagligen är betydligt äldre och att vattenomsättningen förmodligen har varit kraftigt reducerad på grund av permafrost under långa perioder som inkluderar Holocen, fram till nu. Detta kan vara en av orsakerna till att det inte blir samma goda överensstämmelse som det var i Laxemar och på Äspö mellan den redoxzon som detekteras i mineralen och resultaten från uranserieanalyserna, som indikerar att oxidationerna som man ser från Holocen har nått samma djup som tidigare oxidationer under kvartär. Kompletterande analyser kommer att göras av borrhävarna DH-GAP-04.

Erfarenheterna från uranserieanalyser, tillsammans med bestämning av oxidationsgrad hos sprickmineral, har applicerats på uranhaltiga mineral från sprickor i Forsmark i syfte att bättre förstå vilka processer som orsakat mineralutfällningar, samt vilka processer som löser upp fällningarna och ger de förhöjda uranhalter som noterats i grundvattnet. Mineralogi och spårelementkemi analyseras också på dessa prover (Sandström et al. 2011, Sandström och Tullborg 2011), och olika U-faser (till exempel fosfat och silikat) har kunnat identifieras på spricktytor från Forsmarksområdet (SFR). Vidare analyseras grundvatten från flera sektioner i Forsmark i syfte att följa uranhalternas utveckling under monitoringsperioden.

För att öka förståelsen när det gäller betingelser för sulfatreduktion under initiala (ostörda) förhållanden i berggrunden har isotopstudier av lågtemperaturutfällningar av sulfidmineral i spricksystemet i Laxemar analyserats med masspektrometri (Secondary Ion Mass Spectrometry, Sims-tekniken) och resultaten har publicerats i (Drake et al. 2013). Dessa studier visar att det har bildats järnsulfider med biogen signatur på djup närmare en kilometer. Den stora svavelisotopfraktioneringen och variationen av isotopkvoter inom samma pyritkorn indikerar att dessa sulfider fällts ut som ett resultat av mikrobiell aktivitet in situ. Motsvarande studier av sulfid och kalcit utfälda i borrhål (på utrustning) pågår som en del av undersökningarna för att öka förståelsen för sulfidbildningen i borrhålssektionerna.

Modeller av förbrukningen av löst syre i glacialt smältvatten har också utvecklats under SR-Site (Sidborn et al. 2010). Resultaten visar att löst syre endast kan nå deponerade kapslar av använt bränsle under en rad pessimistiska och extrema förhållanden. Experimentella studier av abiotiska reaktioner mellan löst syre och olika mineral, förvarade i sterila flaskor, har utförts och utvärderats på Stockholms universitet, och resultat från dessa studier kommer att publiceras inom kort.

EU-projektet Recosy avslutades under perioden och resultaten har redovisats i ett tiotal vetenskapliga publikationer och rapporter författade av projektdeltagarna. Projektet belyste redoxeffekter på radionuklidkemi, samt svårigheterna med att mäta redoxpotential i både naturliga miljöer och i laboratoriemiljö.

Program

För att öka kunskapen om hur grundvattnets sammansättning ändras med tiden, har laboratoriestudier av jonbytesprocesser nyligen påbörjats på Stockholms universitet. Dessa studier bör resultera i en kvantifiering av utbytet av natrium och kalcium när regn- eller havsvatten infiltrerade de områden som har undersökts av SKB. Isotopdata för strontium som togs fram på Äspölaboratoriet kan också bidra med kunskap om dessa processer. Projektet kommer att bedrivas i samarbete med Posiva.

Undersökningarna av uran i grundvatten och sprickmineral i Forsmarksområdet fortsätter. Kompletterande prover kommer att tas av både borrkärnor och grundvatten. Fokus ligger på mekanismerna för omfördelning (mobilisering/deposition) av uran under olika tidsperioder och redoxförhållanden.

Studier av redoxzonen på det sätt som gjorts på prover från Laxemar/Äspö samt inom GAP-projektet, kan komma att utföras även för Forsmark när nya borrhningar sker.

Isotopstudier av utfällningar av sulfidmineral och kalцит vid låg temperatur i spricksystemet i Forsmark kommer att utföras med Sims, som en jämförelse till isotopstudien i Laxemar (Drake et al. 2013). Vid dessa studier kommer man också att undersöka om det finns tecken på anaerob mikrobiell metanoxidation på stort djup (jämför med Drake et al. 2012). Detta görs genom Sims-analyser av kolisotopkvoter i kalцитkristaller från sprickytor från olika djup.

Efter att de experimentella studierna av abiotiska reaktioner mellan löst syre och olika mineral vid Stockholms universitet är publicerade kan det visa sig att kompletterande data behöver tas fram. Utveckling av effektiva numeriska modeller för nedträngningen av löst syre i sprickor kommer att påbörjas, eftersom erfarenheten från SR-Site var att de numeriska modeller som då användes var extremt tidskrävande.

26.16 Reaktioner med berget – sorption av radionuklider

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Inför Fud-program 2010 hade ett antal mätningar genomförts, till exempel sorption av radionuklider på krossat material och på hela bergbitar (kvantifierat som fördelningskoefficienten K_d), jonbyteskapacitet (Cation Exchange Capacity, CEC) och specifik ytarea (uttryckt med sorptionsisotermen BET). En metod för mätning av K_d -värden på hela bergbitar, där lösta joner transporteras till sorptionsytan via elektromigration, hade utvecklats i ett doktorandprojekt som nu har avslutats. Metoden är flera storleksordningar snabbare än den som används för att utvärdera K_d för sorberande ämnen i ett genomdiffusionsförsök. Ett annat doktorandprojekt hade påbörjats för utveckling av processorienterad sorptionsmodellering. Bakgrunden till projektet var behovet av att minska konceptuella osäkerheter kopplade till användning av K_d -värden. Karakterisering och definition av den effektiva ytarean för sorption har visat sig vara av särskild betydelse.

SSM såg positivt på att SKB delvis hade lyckats förklara den stora spridningen i publicerade K_d -värden, som kan variera över flera tiopotenser för en och samma radionuklid. Det förefaller sannolikt att normalisering till en representativ ytarea är den mest betydande förklaringen. Det påpekades att SKB bör fortsätta dessa undersökningar med syftet att minska osäkerhetsmarginalerna vid användning av K_d -värden i säkerhetsanalysen. Det konstaterades att användbar information eventuellt kunde erhållas från forskning kring vittringskinetik för bergartsbildande mineral, eftersom erfarenheter kopplade till de reaktiva ytornas inverkan är likartade inom detta område. Andelen sekundära mineral med betydligt större tillgängliga ytor än de bergartsbildande mineralen kan vara en viktig faktor. Det kommenterades att metodernas känslighet kan variera stort beroende på försöksutformning och kvoten mellan vattenfas och fast fas.

SSM påpekade även att eftersom K_d -värden uppmätta i laboratorium påverkas av en mängd villkor, så som vattenkemi (pH, Eh, jonstyrka, komplexbildning, konkurrerade ämnen) och sorptionsytornas egenskaper, behövs kompletterande insatser kopplade till grundläggande sorptionsmodeller. Termodynamiska sorptionsmodeller har utvecklats och dessa används alltmer för att få bättre förståelse för sorptionsmekanismer.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

Arbetet inom transportmodellering, med hjälp av data från Äspölaboratoriet, har fortskridit i stort sett enligt plan inom ett doktorandprojekt på KTH i samarbete med Chalmers tekniska högskola. En hel del mätdata har tagits fram på de mineral som finns i berget på Äspö. Det kan nämnas att man har tagit fram mätdata för porositet och mineralers specifika yta samt gjort en kartläggning av vilka mineraler som är viktiga för sorption. Även fördelningen av sorptionen på en yta har undersökts.

I SR-Site användes K_d -värden för att kvantifiera radionuklidsorption i säkerhetsanalysberäkningarna. I Crawford (2010) presenteras en metodologi för hur K_d -värden för användning i säkerhetsanalysen kan tas fram baserat på experimentellt uppmätta K_d -värden i kombination med olika typer av modellering. I korthet går metoden ut på att det experimentellt fastställda värdet multipliceras med ett antal överföringsfaktorer som tar hänsyn till skillnader mellan olika förhållande vid laboriemätningar och in situ. De olika överföringsfaktorerna representerar skillnader i tillgänglig yta för sorption, skillnader i katjonbyteskapacitet, och skillnader i grundvattenkemiska förhållanden. För att ta fram faktorn som kvantifierar skillnader i grundvattenkemiska förhållanden används mekanistisk grundvattenkemisk modellering (till exempel med Phreeqc). Detta steg är snarlikt användandet av smarta K_d -värden som beskrivs i avsnitt 26.24.4. Vid sidan av andra faktorer kan irreversibiliteten av sorption vara en källa av variationer och osäkerheter vid K_d -värden.

Andra framsteg inom sorptionsområdet kan sammanfattas som följande:

- En platsspecifik mekanistisk modell för ytkomplexering i granit utvecklas inom EU-projektet Crock (Rabung et al. 2012). Förhoppningsvis kommer detta att resultera i en generaliserad metodik för hantering av sorptionsegenskaper för ämnen där det inte finns laboriedata. En väl fungerande mekanistisk modell för sorption kan användas direkt i koder för reaktiv transportmodellering, eller för att härleda K_d -värden för plats- och scenariospecifika geologiska och grundvattenkemiska förhållanden (enligt det så kallade smarta K_d -konceptet).
- Ett program (Pathtrac) har utvecklat där icke-linjära sorptionsprocesser kopplas med en modell för transport och matrisdiffusion på ett sätt som möjliggör väsentligt snabbare beräkningar för säkerhetsanalysändamål. Metodiken utvecklas och verifieras inom Crock-projektet. Verifiering sker bland annat med hjälp av fullständigt kopplade modelleringar med hjälp av en välkänd reaktiv transportmodell (CrunchFlow). I princip kan programmet hantera alla typer av icke-linjär sorption som uppkommer på grund av spatiala och temporala variationer i grundvattenkemiska parametrar, såsom klassisk icke-linjäritet, till exempel Langmuir med flera isotermer. Planer finns för att även implementera metodiken i Comsol-Multiphysics för att kunna modellera mer komplicerade 2D/3D-flödessystem med matrisinteraktioner. Det är möjligt att metodiken i framtiden kan introduceras i ett modelleringsverktyg som är specialiserat på att hantera sprickor, till exempel DarcyTools eller ConnectFlow, se avsnitt 26.4.2 Hydrogeologi i det djupa berget.
- Beräkningar har gjorts inom SR-Site för att försöka kvantifiera inverkan av diffusion i stagnanta zoner i säkerhetsanalysen. Retardationen av konservativa ämnen, jämfört med sorberande ämnen som observerades i bland annat Swiw-testerna under platsundersökningen, visar tecken på icke-Fickian dispersion.
- Ett utvecklingsarbete har utförts som syftar till att korrigera elektriska in situ-mätningar av formationsfaktorer för artefakter relaterade till ytkonduktivitet som ger en signifikant påverkan på mätresultaten (SKB 2010q, Rabung et al. 2012 och planerad vetenskaplig publikation).

Resultat från en omfattande kartering och kvantifiering av sprickmineral har analyserats statistiskt och rapporterats (Löfgren och Sidborn 2010a, b). En artikel inom samma ämne förbereds.

Även för sorption av radionuklider på ytor och i bergmatrisen har metoder som inkluderar elektromigration visat lovande resultat (André 2009). Man bör kunna utveckla och tillämpa elektromigration i samband med mätningar för många fler nuklider.

Ett antal olika metodologiska komponenter inom batch-sorptionsexperiment har undersökts (Holgersson 2012). Dessa är total metallhalt, förhållandet mellan fast fas och vattenfas, fassetseparationsmetod, sorption på väggar på experimentutrustning, mätmetod och förbehandlingsmetod. Sorptionen av europium-152 på krossad Kivettygranit med olika storleksfördelningar studerades. Ett syntetiskt, syrefritt och salt grundvatten av den typ som återfinns i Olkiluoto användes med olika initiala pH-värden.

Program

Forskning och utveckling av koder som kan hantera retentionsprocesser, som till exempel sorption, kommer att fortsätta. Fokus kommer att ligga på förståelse och mekanistisk modellering. Inom säkerhetsanalys är det troligt att K_d -konceptet fortfarande kommer att användas. Avsikten är dock att fortsätta utveckla begreppet smarta K_d -värden, eftersom K_d -värdet är beroende av lokala hydrogeokemiska egenskaper. Detta arbete förväntas förbättra de verktyg som används inom säkerhetsanalys.

Arbetet inom transportmodellering, med hjälp av data från Äspölaboratoriet, fortsätter med kompletterande mätningar och tolkning av de experimentella resultaten. En hel del mätdata har tagits fram på de mineral som finns i berget på Äspö. Det har till exempel tagits fram mätdata för porositet och mineralers specifika yta. En kartläggning av vilka mineraler som är viktiga för sorption har också genomförts. Hela studien förväntas beskrivas i en doktorsavhandling.

En fortsatt utveckling av mekanistiska sorptionsmodeller, smarta K_d -värden, programmet Pathtrac och implementering i till exempel Comsol-Multiphysics planeras. Crock (Rabung et al. 2012) avslutades under 2013 men det är möjligt att andra internationella forum för denna utveckling etableras.

För att bättre förstå kopplingen mellan kanalbildning och diffusion i långsamt flödande eller stillastående vatten planeras bland annat omtolkning av data från Swiw-tester. Detta görs med hjälp av transportmodeller som tar hänsyn till sådana effekter.

Vidareutveckling och tillämpning av metoder som inkluderar elektromigration planeras för bestämning av sorption av radionuklider på ytor och i bergmatrisen, på fler nuklider än vad som har gjorts hittills (André 2009). Användandet av elektromigrationsmetoder in situ har potentiella fördelar gentemot mätningar i laboratoriet. Dels för att det är svårt att erhålla en reducerande vattenkemi i laboratoriet, dels för att bergprov tagna till laboratoriet är mekaniskt påverkade. Allmänt är det svårt att översätta data från krossat berg i laboratoriet till intakt berg in situ. Det har även föreslagits att elektriska metoder/elektromigrationsmetoder kan användas vid porvattenanalyser.

Ett annat område där det finns behov av att förstärka den framtida kompetensen är lösningskemi, vilket innefattar bland annat lakning och sorptionsprocesser.

26.17 Mikrobiella processer

Mikrober påverkar grundvattnets kemi genom att påskynda reaktioner som skulle ske mycket långsamt eller inte alls i deras frånvaro, som till exempel sulfidbildning genom sulfatreduktion vid de temperaturer som råder kring förvaren. Då mikrober även behöver näringsämnen som de hämtar från omgivningen, påverkar de den kemiska sammansättningen på grundvattnet genom konsumtion och omvandling av näringsämnen och energikällor. Främst påverkas redoxreaktioner, men även fällnings- och vittringsreaktioner, samt processer som inverkar på radionuklidtransport kan påverkas (Pedersen 2002).

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 angavs att fokus ska vara på mikrobernas förmåga till sulfidbildning och syre-reduktion i när- och fjärrområdet.

SSM bedömde att SKB bör eftersträva en välunderbyggd analys av vilka faktorer som påverkar den långsiktiga utvecklingen av sulfidhalterna över en klimacykel. Vidare ansåg SSM att då acetogena bakterier både kan konsumera och i vissa fall även producera vätgas på stora djup i berggrunden, kan de ha betydelse för vätgasdrivande korrosion även i frånvaro av löst sulfid. De kan därmed påverka kapslarnas livslängd varför också studier av acetogena bakterier behövs. Det behöver även fastställas om begränsande faktorer för metabolismen hos sulfatreducerande bakterier i kompakterad bentonit också gäller för acetogena bakterier.

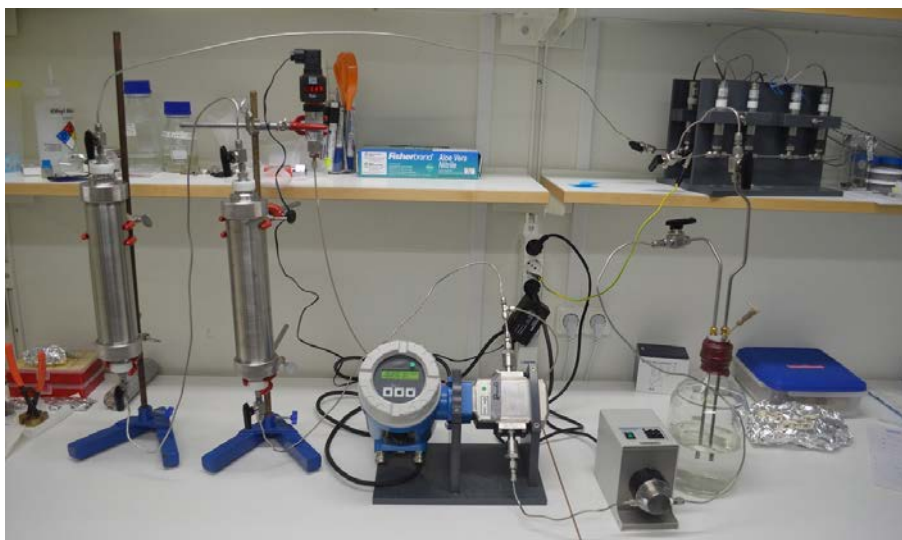
Mätningar som SSM tagit del av gällande löst vätgas i grundvatten på förvaringsdjup är få och i de flesta fall ligger de under detektionsgränsen (Hallbeck och Pedersen 2008) och både provtagnings-tekniken och analysmetoderna behöver därmed om möjligt förbättras.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

Frågan om representativa sulfidhalter blev aktuell i samband med att mycket variabla och i vissa fall förhöjda sulfidhalter uppmättes i borrhål med fast monitoringsutrustning, medan de inledande mätningarna i samband med den kemiska karakteriseringen generellt sett visade betydligt lägre värden. I en fältstudie i Laxemar och vid Äspölaboratoriet (Rosdahl et al. 2011) undersöktes de problem som kan relateras till monitoringsutrustningen. Sammanställning av alla sulfidanalyser som har utförts inom platsundersökningarna har gjorts (Tullborg et al. 2010 a, b) och olika provtagningsmetoder har jämförts. Generellt sett visar vattnet som stått i borrhålssektionen före provtagningen de högsta värdena. Sektionens längd (mellan manschetterna) och antalet vattenförande strukturer samt deras placering i sektionen har stor betydelse för hur stor volym vatten som behöver pumpas bort innan man får vatten som representerar situationen i berget. För att bättre förstå och kunna beskriva de processer som gagnar sulfidproduktionen i borrhålssektionen har några utvalda sektioner i Äspölaboratoriet studerats med avseende på vatten och mineral kemi, mikrober och korrosionsutveckling. Utvärdering av dessa resultat pågår för närvarande och kommer att avrapporteras snart.

Ytterligare publikationer (Hallbeck och Pedersen 2012, Pedersen 2012a, b, c) redovisar forskningen om mikrobiella processer som leder fram till bildning av sulfid, samt om mikrobers förmåga att buffra redoxpotentialen på en låg och för förvaret gynnsam nivå. Arbetet har utförts på förvaringsdjup i Äspölaboratoriet under in situ-förhållanden med naturligt förekommande mikrober. Indikation på att anaerob metanoxidation kan ske i djupa grundvatten har observerats i Finland (Pedersen 2012c), och det finns sprickfyllnadsmineraldata som förklaras av processen (Drake et al. 2012).

Nya metoder har utvecklats för att kunna provta mikrobiella biofilmer på ytor i vattenförande sprickor (Jägevall et al. 2011). Det var emellertid svårt att få fram tillräckliga mängder DNA från ytorna med tillgänglig metodik. Under 2012 utfördes ett metodutvecklingsprojekt, där de tidigare undersökningarna kompletterades med flera olika odlingsmetoder och mätningar av biomassa som har högre känslighet än molekylära metoder. Syftet var att ta fram en kombination av molekylära och odlingsbaserade metoder som kan användas för analyser av sprickytor från borrhåll i Äspölaboratoriet samt i Forsmark. I projektet testades och utvecklades metodik för provtagning samt kvantifiering och aktivitet av mikroorganismer på sprickytor. Tester gjordes på naturliga samt konstgjorda sprickytor, på borrhåll från Äspölaboratoriet. I projektet visades att det är möjligt att upptäcka mikroorganismer på naturliga sprickytor i en borrhåll som hämtats från 400 meters djup i Äspölaboratoriet. Projektet visade också att det är av stor vikt att genomföra provtagning av sprickytor direkt i samband med att borrhåll tas upp. Detta för att inte minska antal överlevande celler och försämra kvaliteten på provmaterial, som i sin tur ger mindre säkra analysresultat. För att möjliggöra anrikning av biofilmer sattes ett cirkulationssystem med två flödesceller upp, se figur 26-2.



Figur 26-2. Cirkulationssystem med två flödesceller (rostfria cylindrarna till vänster) innehållande material för anrikning av biofilmer.

Program

Forskningen om sambandet mellan vätgas, metan, sulfid och mikroorganismer kommer att fortsätta. Ett mål är också att använda en känsligare metod för vätgasanalyser alternativt skicka prover för vätgasanalys till ett laboratorium som har lägre detektionsgräns än det som man hittills har använt sig av. Fältexperiment i några utvalda sektioner i Äspölaboratoriet kommer att utföras för att försöka få bättre kunskap om de processer som sker i borrhålssektioner mellan de olika provtagningstillfällena.

Sambanden mellan innehåll och fördelning av gaser och mikrobiella processer i djupa grundvatten kommer också att utforskas. Insatser planeras även för metodutveckling samt för ökad kunskap om gaser och deras ursprung i grundvatten och bergmatris.

En genomgång av litteratur gällande de senaste forskningsrönen om acetogener i den djupa geosfären kommer att genomföras. Först därefter fattas beslut om eventuella experiment, eftersom dessa acetogener växer mycket långsamt och kan ha generationstider på hundra till tusentals år (se till exempel Lever 2012). Metoder för att analysera biofilmer på sprickytor kommer vidareutvecklas för att minska interferens vid ATP-analys samt DNA-extraktion av biofilmer från sprickytor. För detta ändamål måste en bra metod för anrikning av biofilmer på bergytter tas fram på laboratoriet. Anrikning anses nödvändig då biofilmer i naturlig miljö innehåller mycket liten mängd DNA, ofta under detektionsnivå för molekylära analysmetoder. Metoden ska utformas för att i framtiden kunna anrika biofilmer in situ i Äspölaboratoriet eller i Forsmark.

Studier av mikroorganismers och virus förmåga att påverka radionuklidernas rörlighet i naturlig geosfärsmiljö, där biofilmer utvecklas på sprickytor och sprickmineral, kommer att fortsätta. Behovet av vidareutveckling av modellverktyg för mikrobiella processer kommer att ses över.

Isotopstudier av lågtemperaturutfällningar i spricksystemet i Forsmark kommer att utföras för att undersöka om det finns tecken på anaerob mikrobiell metanoxidation på stort djup, se avsnitt 26.15 Reaktioner med berget – grundvattenkemi.

26.18 Nedbrytning av oorganiskt konstruktionsmaterial

Nedbrytning av oorganiskt konstruktionsmaterial är en process som har betydelse för hydrogeokemin i geosfären i ett initialt skede och i nära anslutning till förvaret, då förhållandena påverkas av utbyggnaden och av stål och cement i förvaret.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Fältexperiment i Grimsel i Schweiz gav data om interaktionen mellan cementporvatten och bergmineraler. Lakning av låg-pH-cement utfördes i en gemensam studie med Nagra, Numo och Posiva med syfte att undersöka om organiska cementtillsatser kan lakas ur och om dessa kan påverka radionuklidsorption på berg. SSM ansåg att egenskaperna hos låg-pH-cement inte är tillräckligt utvärderade och påpekade brister i SKB:s modellering av den långsiktiga utvecklingen hos dessa material.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

Reviderade modeller av cementbaserade injekteringsmedel togs fram och användes inom SR-Site (Grandia et al. 2010). Effekten av cementtillsatser och av stålkorrosion utvärderades i Hallbeck (2010). Studier av hur cementtillsatser kan påverka radionuklidsorption i berget (Andersson et al. 2008) resulterade i att en kompletterande studie av hur olika laboratoriemetoder påverkar erhållna sorptionsdata. Studien kommer att publiceras inom kort.

Program

SKB kommer att följa litteraturen inom ämnesområdet, men inga ytterligare experimentella insatser planeras när det gäller effekter av konstruktionsmaterial på geosfären.

26.19 Kolloidomsättning – kolloider i grundvatten

Kolloider är partiklar i storleksordningen nanometer till mikrometer och har därför hög specifik yta per massenhet. Kolloider kan stanna i lösning under långa tider om stabilitet föreligger. I granitiska grundvatten där mineralytor och grundvatten jämviktat under långa tider, är salthalten relativt hög och naturliga kolloider är därför inte stabila. De naturliga kolloiderna består till stor del av ler-, kisel- och järnhydroxidpartiklar. Även organiska kolloider kan vara närvarande, men på cirka 400 meters djup är halterna låga.

Förutsättningarna för kolloidgenerering från bentonitbufferten kan förändras under en istidscykel. Under en inlandsis eller en förlängd period av global uppvärmning skulle saltfattigt vatten kunna tränga ned till förvarsdjup och i kontakt med bentonitbufferten finns det potential för montmorillonitkolloider att frigöras för vidare transport. Frigörelse av montmorillonitkolloider kan ge massförluster från bufferten, vars funktionalitet därmed skulle reduceras. I fallet av en skadad kapsel kan även radionuklider sorberade till montmorillonitkolloider transporteras ut ifrån bufferten.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Mätningar av naturliga kolloider utfördes vid platsundersökningarna i Laxemar och Forsmark. Laboratorieexperiment av bentoniterosion i artificiella sprickor utfördes. Transportförsök i kolonner med sprickfyllnadsmaterial från Äspö visade att montmorillonitkolloider sorberar även vid ogynnsamma förhållanden. SKB planerade att delta i samarbetsprojektet Colloid Formation and Migration (CFM) i Grimsel som organiseras av Nagra i Schweiz. SKB planerade också att studera hur kolloidstorleken påverkar stabilitet och radionuklidsorption. Behovet av studier av gammastrålningseffekter på montmorillonitkolloider skulle utredas.

SSM uttryckte sig positivt till SKB:s planer, men uttryckte att det fanns ett omfattande behov av ytterligare studier.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

SKB har deltagit i CFM-projektsamarbetet med syfte att undersöka montmorillonitkolloidernas frigörelse och vidare transport. Detta görs både med fältexperimentet i Grimsel och med laboratorieförsök och modellering på KTH. Flera parallella modelleringsaktiviteter pågår inom CFM för att tolka fältexperimenten och för att lägga en grund till framtida säkerhetsanalyser. Dessa resultat är tillgängliga internt för projektdeltagarna som arbetsrapporter, och de kommer att publiceras som rapporter och vetenskapliga artiklar.

Montmorillonitkolloider som har utsatts för gammastrålning har visat sig vara mera stabila i saltfattiga vatten (Holmboe et al. 2009, 2012) än icke bestrålade. I vatten med hög salinitet är varken bestrålade eller icke bestrålade montmorillonitkolloider stabila. De bestrålade montmorillonitkolloiderna har visat sig sorbera signifikant mindre kobolt(II) (Holmboe et al. 2011) som ytkomplexerar till ytan. Sorptionen av positiva cesiumjoner, som katjonbytes, påverkas inte av bestrålningen.

En metod att storleksfraktionera montmorillonitkolloider har utvecklats. Vidare studeras de olika storleksfraktionerna för att se om ytorna ser likadana ut på små som stora kolloider, och vilka implikationer det ger på stabilitet och sorptionsegenskaper.

Program

SKB ämnar fortsätta samarbetet med CFM. Installation av ett fältförsök är planerat till 2014 och försöket och utvärderingen beräknas pågå till 2018. CFM lägger ut uppdaterad information om planerade försök på webben (Grimsel 2013). Transportmodelleringen i CFM-projektet kommer att pågå i fyra utvecklingslinjer: i) fortsatt utveckling av flerfastransportkod där kinetiskt utbyte mellan kolloider, vattenfas och fast fas ingår, med vilken man kommer att utvärdera transportförsöken i Grimsel; ii) fortsatt arbete med Comsol-flödessimuleringsmodell för skjuvzonen i Grimsel som används i CFM för att öka förståelsen för effekterna av heterogeniteter i hydrauliska förhållanden i skjuvzonen; iii) modell för spårämnestransport under transienta flöden ska användas för utvärdering av flera spårämnesförsök där oscillationer i genombrottskurvorna troligen härrör från transienta förhållanden; och iv) koppling av laboratorieresultat med fältdata. Stor del av arbetet kommer att ske på KTH.

Ingående studier på kolloidernas ytegenskaper kopplade till sorption och stabilitet pågår på KTH. Målet är att identifiera om de små kolloiderna är miniatyrer av de stora och därmed har samma ytegenskaper, vilket skulle påverka modellering av stabilitet, transport och sorptionsegenskaper hos de olika storleksfraktionerna.

26.20 Kolloidomsättning – radionuklidtransport med kolloider

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SSM såg positivt på att SKB planerade att fortsätta utvecklingen av kolloidtransportmodeller och försökte få en bättre förståelse av de styrande processerna. SSM ansåg dock att SKB inte hade givit en klar bild av hur data och kunskapsluckor ska fyllas och hur detta kopplar till säkerhetsanalyserna.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Ett doktorandprojekt som studerat bildning, stabilitet och transport av kolloider har avslutats (se avsnitt 26.19). Utveckling av kolloidmodellering har fortsatt och studier har utförts för att förbättra förståelsen av de styrande processerna som är kopplade till bentoniterosion.

I SR-Site användes koden Marfa för att simulera transport med kolloider (SKB 2010k). Två olika gränssättande situationer studerades. För reversibel jämviktssorption av radionuklider på kolloider kan en reduktionsfaktor för de ingående materialparametrarna definieras. För detta fall kan alltså Marfa användas med enbart en omdefinierad inputparameter. Det andra fallet är icke-reversibel sorption på kolloider. För detta fall beräknades andelen nuklider som sorberats på kolloider i ett första beräkningssteg. Sedan användes Marfa i två parallella körningar, en för nuklider irreversibelt sorberade på kolloider och en för nuklider i vattenlösning. Sålunda kunde Marfa användas för samtliga kolloidfall som studerades inom SR-Site.

Inom CFM-experimentet på Grimsel har försök utförts under 2012, där transport av lerkolloider, konservativa spårämnen samt radionukliderna natrium-22, barium-133, cesium-137, neptunium-237, americium-243, plutonium-242 och torium-232 har undersökts. Genombrottskurvorna utvärderas för att se hur snabbt lerkolloiderna transporteras, samt för att se hur stor del av radionukliderna som följer med lerkolloiderna. Beräkningar av sorptionsdynamiken för radionuklider till kolloider har påbörjats.

Program

SKB avser att fortsätta sitt deltagande i CMF-projektet med laboratorieförsök, en doktorand och modellering. CFM-projektets huvudexperiment ska enligt planen starta i början av 2014. Huvudexperimentet inleds med installation av en ringformad bentonitenhet runt en cylinder med packers placerade i ett borrhål som skär en deformationszon. Bentoniten innehåller ampuller med radionuklider som ska frigöras när ampullerna bryts på grund av bentonitens svälltryck. Migration av kolloider och nuklider kan sedan defekteras vid en analyspunkt.

26.21 Gasbildning/gaslösning

Gaser som förekommer lösta i grundvattnet är vanligen de följande, ordnade efter sjunkande koncentration: kväve, metan, argon, helium, koldioxid, väte och kolmonoxid. Dessutom förekommer spår av andra kolväten så som etan, eten, acetylen, propan och propen. Kväve har huvudsakligen sitt ursprung i jordens bildning, det vill säga kvävgas kondenserades med resten av material när planeten bildades, och kvävgas har sipprat till atmosfären genom geosfären sedan dess. De flesta andra gaser kan ha flera källor.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Efter sammanställning av data om lösta gaser i Forsmark och Laxemar konstaterades ett behov av ytterligare data och utveckling av utrustning och analysmetoder av både SKB och av SSM.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Provtagning och analys av gaser samt av isotoper av gaser har genomförts i samband med vattenprovtagning i sulfidfältstudierna som beskrivs ovan i avsnitt 26.17 Mikrobiella processer. Syftet har varit att kunna urskilja de olika gasernas ursprung och därmed bidra till förståelsen av sulfatreduktionen i grundvattnet. Det är framför allt gaserna koldioxid, metan och vätgas som haft störst intresse. Övriga gaser som provtagits är ädelgaser, kvävgas samt etan och eten.

En analys av det långsiktiga gasflödet i det djupa berget utfördes under SR-Site (Delos et al. 2010), där parametrar togs fram för att kunna bedöma hur dessa gaser skulle kunna delta i processer som sulfatreduktion och metanisbildning.

Program

Datering av grundvatten är en av många viktiga frågor att besvara i samband med ett slutförvar. Det gäller både för gamla vatten (till exempel djupt liggande salta vatten eller paleovatten som har bildats i samband med glaciation) men även unga vatten såsom postglaciala nedträngningar av regnvatten i berggrunden. Data om lösta gaser i grundvatten används för detta ändamål. När det gäller yngre grundvatten har tritiumanalyser varit ett bra redskap åtminstone för att särskilja modernt grundvatten från gammalt. Ju lägre de atmosfäriska halterna blir av tritium desto svårare är det att använda tritium. För postglaciala vatten har kol-14 använts. Det är dock viktigt att komma ihåg att kol-14 i princip ger information om kolsystemet (både det organiska och oorganiska) och en översättning till vattnets uppehållstid kräver att hänsyn tas till de reaktioner som påverkat detta system längs flödesvägen.

För att kunna bestämma längre resenstider är isotoperna helium-4, krypton-81, argon-39 och klor-36 (som inte är en gas) mest lämpade. Metoden för provtagning och analys av helium och dess isotoper, helium-3 och helium-4, ska därför utvecklas. Helium-4 är en mantelderiverad gas, men

produceras också genom alfasönderfall i berggrunden. Det är känt att ju längre uppehållstider ett vatten har, desto högre är koncentrationen av helium-4.

Som beskrivs i avsnitt 26.17 Mikrobiella processer kommer forskningen om sambandet mellan vätgas, metan, sulfid och mikroorganismer att fortsätta. För att studera relationerna mellan innehåll och fördelning av gaser och mikrobiella processer i djupa grundvatten planeras insatser för att analysera delta-kol-13 och delta-deuterium i metan och vätgas, vilket tillsammans med andra grundvattenkemiska data kommer att ge information om dessa gasers ursprung.

26.22 Metanisomsättning

Vid låg temperatur och högt tryck bildar vatten och metangas en fast fas som kallas metanis. Metanis kan till exempel bildas under permafrost, se bland annat (Gascoyne 2000). Metanis kan påverka förvaren på olika sätt, se till exempel (Tohidi et al. 2010).

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Studierna i Lupin och i High Lake hade slutförts, men inga förekomster av metanis påträffades på dessa platser.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Studierna i Kanadas permafrostområden analyserades i Stotler et al. (2010). Hittills har inga tecken på metanis hittats inom GAP-projektet, vilket beskrivs i avsnitt 19.7 Greenland Analogue Project.

Potentialen för metanisbildning undersöktes under SR-Site (Tohidi et al. 2010), där man drog slutsatsen att med de metanhalter och flöden som har uppmätts i Laxemar, Forsmark och Olkiluoto så finns inga förutsättningar för bildning av metanhydrater under permafrostperioder.

Program

SKB kommer att följa litteraturen inom ämnesområdet, men inga ytterligare insatser är planerade.

26.23 Saltutfrysning

Då saltvatten fryser långsamt tvingas merparten av de lösta ämnena (salter) ut i den lösning som blir kvar när isen bildas. Processen kan ha betydelse i samband med kallt klimat, till exempel under en period med permafrost.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 konstaterades att även om det finns visst stöd för att utfrysningsprocesser kan ha påverkat grundvattenkemin i Laxemar och i mindre grad även i Forsmark, så har det varit omöjligt att kvantifiera i vilken grad frysningen har modifierat kemin. I planerna för Fud-program 2010 ingick att studier av utfrysningsprocesser i permafrostområden skulle fortsätta inom GAP-projektet. SSM ansåg att dessa studier var angelägna.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Grundvattenprovtagningen i GAP-projektet (som beskrivs i avsnitt 19.7 Greenland Analogue Project) har varit svår och alla data finns inte tillgängliga ännu. Utifrån tillgängliga data har inga bevis funnits för saltutfrysning (Harper et al. 2011), och den rapporterade salinitet i vissa av grundvattnen samt sjövattnen från Grönland kan bero på flera möjliga processer, till exempel avdunstning, eolisk transport av närliggande marina avlagringar, eller geologiska källor. Också den lokala berggrundens geokemi kan vara en betydande kontrollerande faktor för grundvattnets salthalt i Grönland.

Program

Ett nytt provtagningsförsök kommer att göras vid det djupa borrhålet i Grönland och resultaten ska tolkas och rapporteras, se också avsnitt 19.7. Utöver detta kommer SKB att följa litteraturen inom ämnesområdet, och kommer även i framtiden att ha fortsatt vaksamhet när det gäller indikationer på saltutfrysning inom de pågående programmen för hydrogeokemi i Äspölaboratoriet och Forsmark.

26.24 Modellering

26.24.1 DFN

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SSM:s huvudslutsats rörande spricknätverksmodeller var att SKB bör lägga mer arbete på att studera konceptuella osäkerheter inom spricknätverksmodellering. Specifikt pekar myndigheten på:

- Att rumsliga och strukturella relationer mellan sprickor kan vara betydelsefulla för beräknade grundvattenflöden och därmed radionuklidtransport, vilket myndigheten har studerat (Geier 2010).
- Användandet av Äspölaboratoriet som en möjlighet att minska möjliga parameterspann.
- Studier av sprickplanens geometri för att undersöka deras effekt på grundvattenflöde radionuklidtransport, både på sprick- och regional skala.

SKB:s ansträngningar att förbättra förståelsen av spricknätverk i kristallin berggrund sågs som positivt av SSM. Vidare såg myndigheten och Östhammars kommuns konsult positivt på SKB:s ansträngningar att integrera de olika disciplinernas spricknätverksmodeller.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Itasca i Frankrike har tillsammans med Universitetet Geosciences Rennes tagit fram en ny modell för generering av sprickor med trunkeringar kallad UFM 2013 (Davy et al. 2013). Modellen, som utgår från en Pareto-fördelning av sprickstorlekarna, resulterar i en storleksfördelning som har olika lutning för små sprickor respektive stora, beroende på genereringshastighet och applicerade trunkeringsregler.

Osäkerheterna i orienteringen av objekt mätta i borrhål påverkar utvärderingen av data och kan resultera i felaktiga spricknätverksmodeller. Detta rör främst koncentrationsparametern, val av orienteringsmodell samt i mindre utsträckning medelpolen för spricksetet (Stigsson och Munier 2013). Detta i sin tur kan komma att påverka sammanlänkningen (konnektiviteten) av spricknätverket.

En metodik för att definiera sprickdomäner på rent statistisk bas har tagits fram och redovisas i Darcel et al. (2012). En mer utförlig rapport är under granskning och kommer att tryckas inom kort.

Program

I Fud-program 2010 identifierades sex punkter för att öka förståelsen av diskreta spricknätverk i kristallin berggrund:

1. Undersöka hur uppskattad intensitet beror på mätmetod.
2. Utreda vilka extra data som måste beaktas för att begränsa möjliga värden och kombinationer av värden för indata och därmed begränsa utfallsrummet för modellerna.
3. Utveckla metod för att enklare kunna utvärdera skillnader mellan olika modeller.
4. Ytterligare utforska sprickornas aperturfördelning över sprickplanet.
5. Studera effekter av sammankoppling av sprickor, till exempel genom kanalbildning, trunkering mot andra sprickor, eller alternativa metoder för generering av spricknätverk.
6. Fortsättningsvis utvärdera alternativa koncept för sprickgenerering.

Dessa sex punkter kommer även fortsättningsvis att vara grundstenar i arbetet med utvecklingen inom spricknätverksmodellering. Därutöver kommer en sjunde punkt rörande påverkan av orienteringsosäkerheten på objekt mätta i borrhål och dess konsekvens på DFN-modellerna att studeras närmare.

Det noteras att det under den kommande treårsperioden hanteras frågor kopplade till sprickors aperturfördelning (punkt 4 ovan) och kanalbildning (punkt 5 ovan) i projekt beskrivna i avsnitt 26.12 Advektion/dispersion – radionuklidtransport.

Utifrån resultaten från UFM-modellen har ett projekt där konceptet appliceras på data från Äspö startats, för att pröva dess kapacitet att återspegla kända data. Detta projekt berör punkterna 5 och 6 ovan och i viss mån även punkt 2.

Punkt 6 ovan hanteras i ett specifikt projekt, DFN-R, som beskrivs nedan. Övriga punkter på listan kommer inte att belysas ytterligare under den kommande treårsperioden.

Fortsättningsvis kommer metoden att utvärdera osäkerheterna för objekt mätta i borrhål att förfinas. Arbetet förväntas resultera i en möjlighet att kunna uppskatta de bakomliggande orienteringsparametrarna för sprickseten genom inversmodellering. Effekterna av att ta hänsyn till eller negligera orienteringsosäkerheten kommer även att studeras genom utvärdering av till exempel sammanlänkingsgrad och flöde.

Diskret spricknätverksmodellering är en central del av säkerhetsanalysen för KBS-3-konceptet i sprucket berg. DFN-modelleringen i SR-Site var baserad på stokastiska metoder då tillgänglig information främst fanns i statistisk form, det vill säga bergets sprickegenskaper var, med få undantag, inte deterministiskt kända i rummet. Målet för DFN-R-projektet (där R står för repository) är att ta fram en ny metodik för DFN-modellering med syftet att användas i samband med utbyggnaden av Kärnbränsleförvaret. Viktiga delar i DFN-R-projektet är att:

1. Utveckla en ämnesgemensam DFN, som samtidigt tar hänsyn till geologiska, bergmekaniska och hydrogeologiska frågor.
2. Utveckla en metodik för betingad stokastisk simulering av uppmätt information i pilotborrhål, deponeringstunnlar och deponeringshål på förvarsnivå.
3. Identifiera vilken undersökningsstrategi som den framtagna metodiken förutsätter.
4. Kritiskt granska innebörden av grundläggande antaganden i den metodik som föreslås.

Den tredje punkten understryker behovet av samordning mellan DFN-projektet och detaljundersökningsprogrammet (se avsnitt 14.4 Detaljundersökningar). DFN-R-projektet beräknas pågå under tre år, det vill säga mellan 2013 och 2015, och kommer att koordineras med liknande aktiviteter som initieras av Posiva. I tillämpliga fall kommer även data från Posivas anläggning Onkalo att analyseras.

26.24.2 Integrerad modellering – termo-hydro-mekanisk utveckling

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 betonades att en viktig utgångspunkt i designfilosofin för Kärnbränsleförvaret i Forsmark kommer att vara tillämpningen av Observationsmetoden. För att kunna göra bättre prognoser för det förväntade termiska, mekaniska, och hydrauliska beteendet, är det nödvändigt att utveckla modeller som kan kalkylera parametrar som successivt kommer att kunna mätas under förvarets byggnation. Detta är inte ett triviale problem eftersom det ofta går att mäta det som inte går att kalkylera och tvärtom. Detta innebär att prediktions- och uppföljningsplaner måste utarbetas omsorgsfullt och med god förståelse för problemets art. Mot en sådan bakgrund är det bland annat av intresse att utveckla tillämpning av så kallade proxyparametrar (ungefär ställföreträdande parametrar) i modellering. Med hänsyn till Observationsmetodens förutsättningar och för att kunna hantera olika bergmekaniskt kopplade frågeställningar är bevakning av beräkningsprogram som beskriver bergmekaniska skeenden i olika skalor en viktig löpande uppgift för SKB inom Berglinjen, se avsnitt 14.4.2.

SKB beskrev sitt deltagande i projektet Decovalex 2011 som bestått av tre individuella delar:

- i) ventilationsexperiment i en lertunnel i Mont Terri, ii) Äspö pelarstabilitetsförsök, Apse, och
- iii) flödestransport samt hydrogeologisk modellering av en vattentunnel i Tjeckien. Apse-försöket

analyserades av sju olika modelleringsteam, bland annat ett från SKB. Den första delen av arbetet fokuserade på att utveckla modeller som kan simulera enaxiella tryckhållfasthetsprov på borrhärdar. Stora framgångar nåddes genom att använda modeller som simulerar bergets mineralsammansättning (Lan et al. 2013).

SSM ansåg att vissa konceptuella frågeställningar från granskningen av Fud-program 2007 inte i tillräcklig omfattning beaktats i Fud-program 2010. SSM betonade speciellt frågeställningar om nysprickbildning, sprickpropagering och sammanbindning av existerande sprickor i närheten av deponeringshål. De processer och scenarier som SSM speciellt önskade analyserade gällde reaktivering av deformationszoner på grund av storskaliga termiskt inducerade spänningar i slutförvarets närområde eller nära ytan (Rutqvist och Tsang 2008) samt inverkan av en inlandsis på sprickpropagering och kortslutning av spricknätverket mellan närliggande deponeringshål (Backers och Stephansson 2012).

Angående modelleringstekniska aspekter så framhöll SSM att när det gäller bergmekanik och kopplade processer så bör SKB i modelleringen eftersträva att kvantifiera inverkan av realistiska sprickgeometrier på tillstånd och processer relevanta för säkerheten. Vidare framhöll SSM att SKB bör eftersträva en koppling mellan bergspänningsmodellerna på förvarsskala och regional skala samt att modellerna ska utreda förkastningsstabilitet under en glaciationscykel.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

SKB har initierat ett utvecklingsprogram med nya beräkningskoder och resultatverifiering utifrån de unika databaser som upprättats i olika studier i Sverige eller internationellt. Målet med programmet är att försäkra sig om att de nyare modelleringsmetoderna har väsentliga fördelar i relation till nuvarande angreppssätt. Vidare ska programmet ge insikter om respektive modellkods begränsningar. Programmet ska ses som en övergripande utveckling av modelleringsstrategi för att kunna tillämpa bästa möjliga modellverktyg när undermarksarbetena startar i Forsmark.

SKB har fortsatt att vidareutveckla de konceptuella antagandena om spännings-transmissivitetssamband för sprickor och deformationszoner, som nu används för att utvärdera resultat från mekaniska och termomekaniska simuleringar av förvarets utveckling. En initial analys av spännings-transmissivitetssamband av data från Forsmark har genomförts. Studien analyserade PFL-bestämda spricktransmissiviteter och normalspänningar över kända deformationszoner. Sammanfattningsvis visar inte studien något uppenbart stöd för att uppfattningen att storleken av flödet längs sprickor i Forsmark enbart styrs av den normalspänning som verkar över deformationszoner eller uthålliga sprickor. Detta är inte överraskande eftersom majoriteten av sprickorna/zonerna är bildade för mer än en miljard år sedan och det aktuella spänningstillståndet bara har varit rådande under de cirka senaste 12 miljoner åren. Det är mer troligt att transmissivitetsvärdena styrs av sprickrätter, öppna kanaler och mineralutfyllnader (Martin och Follin 2011, Martin et al. 2010).

SKB har inlett studier för att ta hänsyn till den diskontinuerliga fördelning av transmissivitet och magasincoefficients som finns i berggrunden. Arbetet är en fortsättning på de teoretiska och laborativa studier som fokuserat på hydromekaniska kopplingar i enskilda sprickor (Ericsson et al. 2009, Fransson 2009).

Fokus för modelleringen av Apse-försöket inom Decovalex-programmet har varit att anpassa kopplade termomekaniska modeller för att kunna beräkna hur spänningen i pelaren förändras då den värmdes upp. Målet har varit att bestämma spjälkningshållfastheten i pelaren. I ett efterföljande skede genomfördes elastoplastisk modellering för att simulera geometrin på det brott som uppstod i pelaren. Sammanfattningsvis visar modelleringsinsatserna (Lan et al. 2012) på lovande möjlighet att belysa betydelsen av heterogenitet i mineralornsskala på brottutvecklingen, se avsnitt 26.9 Sprickbildning.

Program

Det av SKB initierade utvecklingsprogrammet för nya beräkningskoder och resultatverifiering kommer att fortsätta i form av flera delprojekt som samordnas. Målet med programmet är att försäkra sig om att de nyare modelleringsmetoderna har väsentliga fördelar i relation till nuvarande angreppssätt. Vidare ska programmet ge insikter om respektive modellkods begränsningar. Det

innebär att vissa konceptuella termo-hydro-mekaniska frågeställningar också omfattas av utvecklingsprogrammet som i sin tur även berör de ovan beskrivna processerna: rörelser i intakt berg, termisk rörelse, reaktivering – rörelse längs befintliga sprickor, sprickbildning och tidsberoende deformationer. Programmet ska ses som en övergripande utveckling av modelleringsstrategi för att kunna tillämpa bästa möjliga modellverktyg när undermarksarbetena startar i Forsmark. De viktigaste delprojekten är:

Termomekanisk modellering av Prototypförvaret i Äspölaboratoriet: Ett viktigt moment i modelleringsarbetet är att testa modelleringsmetodiken (kontinuumrepresentation av berget med homogena egenskaper) som använts i SKB:s säkerhetsanalys genom att jämföra mätdata med observationer. Utifrån detta diskuteras krav på detaljeringsnivå i materialmodell och initialtillstånd, betydelse av lokala/storskaliga variationer (skalberoende) i materialegenskaper samt eventuella kvalitativa och kvantitativa avvikelser mellan uppmätta värden/observationer och modelleringsresultat.

Portrycksutvecklingen under slutförvarets olika faser: Arbetet fokuseras främst på att beskriva portrycksutvecklingen under slutförvarets olika faser. Fokus har också legat på att sammanställa resultat från de studier som utförts inom SR-Site (Hökmark et al. 2010, Lönnqvist och Hökmark 2010) angående hydro-mekaniska kopplingar och maximalt djup för hydraulisk uppspräckning under en glaciationscykel.

Utveckling av DFN för simulering av sprickighet i kristallint berg: SKB har använt en DFN-strategi för att simulera grundvattenflödet (hydro-DFN) och naturliga spricksystem (geo-DFN). Det är dock inte känt vilka egenskaper denna representation av naturliga spricksystem behöver för att simulera bergmassans hållfasthet vilket SKB avser studera närmare jämte möjligheten att simulera flöde i en diskontinuerlig sprängskadezon. EDZ-modellen från Äspö (Ericsson et al. 2009, Olsson et al. 2009) bedöms kunna vara en lämplig utgångspunkt.

Vid geo-DFN-modellering omfattas alla sprickor, det vill säga öppna, slutna och delvis förseglade. Även slutna sprickor kan ge svaghetsplan i intakt berg, och deras inverkan på bergmassans hållfasthet bör vara mindre än effekten av öppna sprickor. Känslighetsstudier ska genomföras för att bedöma betydelsen av öppna respektive slutna sprickor, och deras konnektivitet (se även avsnitt 26.24.1 DFN).

Konceptuell förståelse av bergmassans hydro-mekaniska egenskaper: Konceptuella modeller för hydromekanisk koppling vidareutvecklas och då särskilt med hänsyn till sprickgeometri och geologisk historia. Med laboratorie- och fälttester som grund verifieras de konceptuella modellerna och ger indata till numerisk modellering. Dessutom ska delprogrammet utveckla och förbättra karakteriseringsmetoder för att beskriva hydromekaniska samband vilka i sin tur utgör underlag för projektering och byggande av Kärnbränsleförvaret.

26.24.3 Integrerad modellering – hydrogeokemisk utveckling

Den enklaste hydrokemimodellen är en beskrivning av den rumsliga fördelningen av halterna av de viktigaste lösta ämnena i bergvolymen. Håltfördelningarna av enskilda lösta ämnen kan i vissa fall indikera specifika pågående kemiska processer. Mer kunskap nås genom en statistisk bearbetning med multivariatanalys, som ger en uppdelning i olika klasser. De olika klasserna representerar vatten som genomgått en viss utveckling. Genom att jämföra de olika klasserna kan deras olika utvecklingsvägar identifieras, oavsett var i volymen de förekommer. Dessa klasser utgör sedan en grund för fortsatta beräkningar av reaktioner och blandningsförhållanden (Laaksoharju et al. 1999). De framräknade blandningsproportionerna och den verkliga uppmätta sammansättningen utgör grund för att beräkna omfattningen av reaktioner. Genom att koppla reaktionerna med grundvattenflöde och ämnestransport kan man få kraftfulla verktyg som kan ge en fördjupad förståelse av möjliga långtidsförändringar under kommande glaciala cykler.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Vid Fud-program 2010 hade platsmodellerna för Laxemar och Forsmark tagits fram och EU-projektet Funmig avslutats. Man planerade att starta utvecklingen av kopplade reaktiva transportmodeller som baserade sig på strömlinjesimulatorer.

SSM konstaterade att det fanns ett utvecklingsbehov för kopplade geokemi-transportkoder och påpekade behovet av ökad fokusering på salthaltsutvecklingen i Forsmarkslinsen under en hel klimatcykel.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

I säkerhetsanalysen SR-Site (Salas et al. 2010) kopplades resultat från grundvattenflödes- och advektionsberäkningar med en kemisk modell, se också avsnitt 26.11 Advektion/blandning – grundvattenkemi. Modeller av förbrukningen av löst syre i glacialt smältvatten har också behandlats under SR-Site (Sidborn et al. 2010), se avsnitt 26.15 Reaktionen med berget – grundvattenkemi.

Modeller där man har svetsat samman transport och kemiska reaktioner är förbundna med väldiga utmaningar i form av beräkningseffektivitet och genomförbarhet på grund av storleken på de regionala systemen och svårigheten med att integrera olika processer som sker över vitt skilda tids- och rumsskalor. Dessa problem har vanligtvis övervunnits genom att anta en kompromiss: antingen (a) en representation av platsens hydrodynamik med en överförenklad geometri (till exempel tvådimensionella tvärsnitt), men med en detaljerad beskrivning av geokemiska processer, eller (b) en komplex tredimensionell hydrogeologisk modell där ämnestransport löses förenklat, till exempel med K_d -baserade uttryck.

En effektiv geometrisk lösning är användning av strömlinjemodeller. Metodiken, som fått namnet Fastreact (Framework for Stochastic Reactive Transport), bygger på teorin om stokastiska konvektiva modeller (Shapiro och Cvetkovic 1988, Simmons et al. 1995), som anger att, under vissa förutsättningar, ett komplext transportproblem kan delas upp i ett antal oberoende strömlinjer (partikelbanor). Det numeriska ramverket har anpassats för geokemiska reaktioner: hela strömlinjeuppsättningen återges med en enda Phreeqc endimensionell reaktiv transport (Parkhurst och Appelo 1999). Simulering där den längsgående koordinaten, till exempel avståndet från en föroreningskälla, tolkas i termer av advektiv transporttid. Fastreact har testats mot syntetiska fall som representerar flödes- och transportförhållandena i mildt heterogena porösa medier och rapporten är för närvarande föremål för granskning (Trincherio et al. 2013), se också andra tillämpningar som beskrivs i nästa avsnitt 26.4.4.

Under de senaste åren har man kunnat utveckla kraftfulla numeriska verktyg, baserade på massivt parallella högpresterande datorsystem, tillsammans med effektiva numeriska metoder. Dessa nya modeller kan undvika de kompromisser som tidigare var nödvändiga.

Modelleringsverktyget ConnectFlow har utvecklats vidare, bland annat har möjligheter att inkludera geokemi och grundvattenkemi lagts till genom att integrera Phreeqc, vilket också nämns i avsnitt 26.4.2 Hydrogeologi i det djupa berget. Denna utveckling har dragit nytta av den tekniska utvecklingen av datorer och en ökad parallellisering av koden. Utvecklingen möjliggör mer realistiska palaeohydrogeologiska simuleringar och transport av reaktiva ämnen till exempel från upplösning av injekteringscement samt att följa utvecklingen av grundvattnets pH. Det är också möjligt att representera en spatial variation av mineraler. Jonbytesreaktioner är inkluderade och det går att modellera igentäppning av porer.

Program

När modelleringen blir mer avancerad genom att integrera hydrogeologi med geokemi, växer även behovet av tester och konfirmation av resultat. Resultaten bör om möjligt testas mot fältförsök och andra modelleringskoncept. Det är troligt att de traditionella koncepten till exempel K_d kommer att användas ännu ett tag inom till exempel säkerhetsanalysen. Resultat från förenklade modeller bör dock jämföras med resultat från verktyg som använder de nyutvecklade koncepten.

Fastreact kommer att användas för att simulera den hydrogeokemiska utvecklingen i Forsmark. Resultaten kommer att jämföras med de beräknade av Salas et al. (2010), baserade på reaktiv blandningsstrategi.

I ett separat spår behöver man tillämpa effektiva numeriska modeller för så kallade "styva" system av ordinära differentialekvationer, som gäller vid modellering av nedträngningen av löst syre i sprickor. Erfarenheten från SR-Site var att de numeriska metoder som då användes för icke-styva system var extremt tidskrävande.

Inom Detaljundersökningsprogrammet planerar man att utveckla ett nytt numeriskt gränssnitt, Bridge-iDP, för att förbinda DarcyTools (Svensson 2010) med det kraftigt parallelliserade modelleringsverktyget Pflotran (Hammond et al. 2011), som nämns i avsnitt 26.4.2. På grund av dess numeriska effektivitet förväntas den kopplade modellen vara en god plattform för modeller i regional skala med helt kopplade reaktiva transportmodeller i granitiskt berg. Forsmark kommer också att användas som testfall för iDP. Målet är att förbättra platsförståelse, testa konceptuella modeller och ta fram långtidsförändringar av de hydrogeokemiska förhållandena, särskilt på förvarsdjup.

Utvecklingen av ConnectFlow med avseende på integration av Phreeqc, som nämns också i avsnitt 26.4.2, kommer att fortsätta. Det uppdaterade modelleringsverktyget bör testas mot andra jämförbara koder. Dessutom planeras det att applicera det utökade modelleringsverktyget på problem där man förut var tvungen att förenkla simuleringarna av till exempel palaeohydrogeologisk utveckling för en plats och upplösning av cement som använts för injektering.

26.24.4 Integrerad modellering – radionuklidtransport

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SSM var positiv till att SKB har utvecklat den alternativa beräkningskoden Marfa för radionuklidtransport.

SSM var positiv till att SKB har genomfört spårämnesförsök i fält. Fältförsöken är ett kraftigt verktyg som bidrar till ökad processförståelse och som kan förbättra tilliten till transportmodellernas parametrering i säkerhetsanalysen.

SSM såg positivt på de planerade aktiviteterna som vidareutveckling av Marfa och ytterligare Swiwtester. SSM ansåg dock att SKB inte på ett tydligt sätt redovisade den integrerade transportmodelleringens roll i säkerhetsanalysen. SSM ansåg att SKB bättre bör integrera konsekvensanalyserna för biosfären och geosfären eftersom SKB:s konsekvensanalys i dag fortfarande är indelad i två separata delar vilket leder till att vissa processer inte fullt ut kan hanteras med den nuvarande metoden, till exempel radionuklidens sönderfallskedjor.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2010

En modelleringsstudie har genomförts för att utvärdera möjligheten att använda en strömrörsmetodik för att beräkna geokemisk utveckling och transport av reaktiva lösta ämnen längs med flödesvägar. Modellverktyget Fastreact har använts i denna studie (Trincherio et al. 2013) där flödesvägarnas geometri och advektiva transporttider kommer från en fristående grundvattenflödessimulering. Resultaten indikerar att detta kan vara ett kraftfullt verktyg för simulering av geokemisk utveckling (då lösningarna är endimensionella längs med flödesvägarna), men blandningseffekter försummas. De kopplade geokemiska-hydrogeologiska modellutvecklingsprojekten som beskrivs i avsnitt 26.24.3 bedöms mer lovande i detta hänseende. När det gäller transport av lösta ämnen såsom radionuklider kan användningen av smarta K_d -värden, se Program nedan, vara ett alternativ till metodiken som Fastreact erbjuder.

I SR-Site användes radionuklidtransportkoden Farf31 (Norman och Kjellbert 1990) för produktionsberäkningar. Den nya koden Marfa (Painter och Mancillas 2009) användes för stödjande beräkningar, specifikt för simulering av radionuklidtransport under glaciala cykler samt för analys av geosfärens retentionsfunktion.

I de glaciala beräkningarna användes en förenklad metodik där effekten av förändrade flödesförhållanden inkorporerades enbart genom att ändra på den advektiva transporthastigheten vid olika klimatregimer, men inte ändra flödesvägarnas geometri. I en studie utförd efter SR-Site (Selroos et al. 2012) har en mer utförlig analys av radionuklidtransport under glaciala cykler utförts. Specifikt har en uppdaterad version av Marfa (version 3.3.1) använts där både flödesmagnitud och -riktning samt förändringar i flödesfältet kan hanteras. Resultaten indikerar att metoden som användes i SR-Site oftast är klart konservativ. Den i SR-Site använda metodiken missar mycket av den rumsliga spridning och utspädning som variabla flödesfält under en glacial cykel innebär. Vidare ger den i SR-Site använda metoden en överskattning av genombrottskurvan under permafrostförhållanden.

Även en mer utförlig analys av geosfärens retention med verktyget Marfa har utförts (Selroos och Painter 2012). Jämfört med vad som gjordes i SR-Site så studerades effekten av retention i deformationszoner, tunnlar och jordlager mer noggrant (i SR-Site var fokus på effekt av EDZ och den så kallade Crown space i tunneltaket). Den nya studien visar att deformationszoner med realistiskt ansatta egenskaper kan utgöra ett stort bidrag till retentionen av radionuklider (större effekt än vad som tillgodosågs i SR-Site). Vidare visar studien att även retention i tunnlar och jordlager kan vara betydande; i tunnlar är det den advektiva fördröjningen som bidrar till retentionen, medan det i jordlager är sorption av sorberande nuklider som bidrar till retentionen.

Ett antal arbeten rörande spårämnesförsök utförda i samband med platsundersökningarna har gjorts. I Nordqvist et al. (2012) redovisas upplägg, utförande och experimentella resultat av de olika spårämnesförsök som utfördes i Forsmark och Laxemar-Simpevarp. Enhålstest (Swiw) och sorberande tvåhålstest över förhållandevis kort skala för att verifiera retention diskuteras, liksom de storskaliga testen över flera hundra meter i deformationszoner och spricknätverk för att studera konnektivitet.

I Cvetkovic och Cheng (2011) redovisas numerisk modellutvärdering av ett urval av Swiw-testen med uranin och cesium som spårämne. Studien visar att retention vid Laxemar-Simpevarp är större än i Forsmark. Detta är i enlighet med vad som tidigare presenterats i SDM-Site (Crawford 2008, Crawford och Sidborn 2009). Vidare indikerar resultaten att vissa sprickor i Forsmark eventuellt kan ha ett tunt lager på sprickytan med högre porositet än bakomliggande matrisberg.

Det så kallade Tracer Retention Understanding Experiment (True-1 och True Block Scale) är avslutat, men publicering av resultaten i vetenskapliga tidskrifter fortsätter. I Cvetkovic et al. (2010) utvärderas spårämnesförsök gjorda inom True Block Scale; resultaten visar att retentionen är diffusionskontrollerad. I Cvetkovic och Frampton (2010) visas hur diskret spricknätverksmodellering kan användas i utvärderingen. De två artiklarna tillsammans ger en sammanhållen metodik för hur utvärdering av spårämnesförsök kan göras. I Cvetkovic (2010a) studeras vidare möjligheten till prediktion av diffusionskontrollerade spårämnesförsök på olika skalor. Studien visar att prediktion på skalor upp till 200 meter är möjlig med hjälp av en enkel modell och användande av oberoende uppmätt information. I Cvetkovic (2010b) studeras effekten av omvandlingar av matrisen närmast sprickytan (engelskans rim zone) mer utförligt. Studien visar att denna typ av omvandlad zon som man observerat hos sprickor i Äspölaboratoriet kan ha stor betydelse för ytterligare retention av sorberande nuklider på långa tidsskalor.

I True-1 Completion-projektet har ytterligare studier gjorts på experimentplatsen för True-1 för att om möjligt verifiera tidigare antaganden och resultat. Det primära övergripande målet för True-1 Completion var att förbättra kunskapen om den inre strukturen av den i försöket dominerande strukturen (sprickan). Vidare var ett mål att uppdatera den konceptuella modellen för denna struktur. Arbetet utfördes i tre huvuddelar bestående av spårämnesförsök och hydrauliska tester, epoxiinjektion med överborrning och kärnkartering, samt analys av kärnmaterial. En av de övergripande slutsatserna är att strukturen i fråga är heterogen med avseende på konduktivitet och/eller konnektivitet inom borrhålsområdet och är undulerande och/eller trappstegsformad. Slutligen konstateras att bergmatrisen spelar en viktig roll för retentionen, men att interaktionen mellan cesium och berg påverkas av icke- eller långsamt reversibel sorption. En enkel katjonutbytesmodell är sålunda inte tillräcklig för en tillfredsställande beskrivning av resultaten. Resultaten uppnådda inom True-1 Completion motsäger inte tidigare resultat, utan snarare förtydligar och förstärker tidigare resultat.

Det planerade Swiw-experimentet med syntetiskt grundvatten som presenterades i Fud-program 2010 har genomförts och kommer att rapporteras. Två experiment med ett flertal olika spårämnen har genomförts (ett test med vänteperiod, ett test utan vänteperiod mellan injicering och återpumpning). Spårämnena antingen tillfördes eller togs bort från det syntetiska grundvattnet. Experimenten var framgångsrika med väldefinierade genombrottskurvor för samtliga spårämnen. Tydliga skillnader kunde konstateras för samtliga spårämnen mellan fallet med eller utan vänteperiod. Skillnaderna är kvalitativt konsistenta med vad som förväntas givet spårämnenas diffusionsegenskaper. Analys av de tillförda spårämnena indikerar att matrisdiffusion är verksam under experimentet, men en enkel modell med användande av en konstant diffusionskoefficient kan inte förklara både den tidiga och sena delen av genombrottskurvan.

Generiska modelleringsstudier med syfte att förbättra simulering av transport av lösta ämnen såsom radionuklider i sprickor och spricknätverk har fortsatt. I Frampton och Cvetkovic (2011) samt Cvetkovic och Frampton (2012) studeras advektiv gångtid respektive det flödesrelaterade transportmotståndet i diskreta spricknätverksmodeller baserade på sprickdata från Laxemar. Studierna använder funktionen tempered one-sided stable density (Toss) för att analytiskt beskriva advektiv gångtid och flödesrelaterat transportmotstånd. I Cvetkovic (2011) generaliseras Toss-modellen ytterligare, och relateras till andra befintliga transportmodeller såsom advektions-dispersionsekvationen. I Cvetkovic (2012) presenteras en generell modell för retentionsprocesser i grundvattentransport. Modellen kan, exakt eller approximativt, återskapa de flesta i litteraturen kända retentionsprocesser som kan ha betydelse för transporthastigheten.

Program

Vidareutvecklingen av koden Marfa fortsätter. Under kommande period ska viss funktionalitet läggas till, exempelvis diffusion in i stagnant vatten med vidare diffusion in i matrisen. Vidare kommer koden att göras allmänt tillgänglig via Open Source-konceptet.

När gränssnittet mellan DarcyTools och Pflotran är färdigutvecklat (se avsnitt 26.24.3) skulle det kopplade verktyget kunna användas till att ta fram mer realistiska K_d -värden (smarta K_d -värden) för radionuklidtransport i Marfa. K_d -värdena skulle då beräknas med hjälp av den lokalt och temporärt rådande geo- och vattenkemin. Därmed har man skapat modellkedjan DarcyTools-Pflotran-Marfa som skulle kunna användas i till exempel säkerhetsanalysen. Själva kodutvecklingen här ligger i att skapa gränssnitten mellan DarcyTools-Pflotran och Marfa så att hanteringen blir rationell och enkel för kodanvändaren. Som ett första steg i denna utveckling skapas dock ett gränssnitt mellan koderna Fastreact och Marfa som båda baseras på endimensionella transportvägar. Fastreact beräknar här K_d -värden (som kan variera längs med transportvägen och i tiden) för given grundvattenkemi; dessa K_d -värden används sedan i Marfa.

Marfa kommer även att användas i en studie där transport i geosfär och biosfär kopplas ihop transient. För att uppnå denna koppling krävs viss kodmodifikation i input/output mellan koderna, men inte någon förändring i kodernas conceptualisering av transportprocesser. Syftet med studien är att se om och när de vanligen använda doskonverteringsfaktorerna är konservativa. I den planerade studien används sålunda det verkliga utsläppet från geosfären som tidsvarierande input i biosfärmodellen. I den metodik som användes i SR-Site räknar man i biosfärmodellen ut en doskonverteringsfaktor baserat på ett enhetsutsläpp från geosfären. Denna doskonverteringsfaktor definieras för den maximala dosen i biosfärmodellen, och används sedan som en konstant för att räkna ut dos från geosfärens utsläpp. Detta förfaringssätt bedöms vara konservativt, men en formell kvantifiering återstår att göra.

Vidare kommer mer allmän forskning kopplad till utvärdering av spårämnesförsök och utökad processförståelse via integrerad modellering av grundvattenflöde och/eller transport av lösta ämnen att fortsätta. Specifikt ska de utförda Swiw-experimenten med syntetiskt grundvatten analyseras vidare med mer komplexa modeller än de som använts nu.

Utvecklingen av kanalnätverksmodellen Chan3D (Gylling 1997) kommer att fortsätta. Chan3D bygger på att grundvattenflöde och transport av lösta ämnen sker i ett nätverk av kanaler i sprickigt berg. Transportdelen innehåller bland annat matrisdiffusion, sorption på spricktor och i bergmatrisen samt sönderfall. Diffusion in i stagnanta zoner med efterföljande diffusion in i en bergmatris bestående av olika mineral ska implementeras. Den hydrodynamiska dispersionen är inbyggd i kanalnätverket och behöver inte inkluderas med hjälp av antagna parametrar. Modelleringsverktyget kan kopplas till närzonsmodellen Near3D och kan därmed hantera större delen av de beräkningar som normalt ingår i säkerhetsanalysen. Förbättrade metoder för att inkorporera data från borrhål och tunnlar planeras också.

27 Ytnära ekosystem

Ytnära ekosystem, eller biosfären, omfattar lösa avlagringar (jordlager och sediment), ytligt grundvatten, ytvatten, landytan och den undre delen av atmosfären, samt alla organismer som finns i dessa miljöer. Konsekvenserna av ett eventuellt utsläpp från ett slutförvar för använt kärnbränsle eller annat radioaktivt avfall, i form av en stråldos till människor, djur och växter, uppkommer när radionuklider omsätts i ekosystemen. Beräkningar av radionuklidernas ackumulation och omsättning i ytnära ekosystem, och av de risker som är förknippade med ett eventuellt utsläpp, är därför en viktig del av säkerhetsanalysen. De beräknade strålriskerna används dels för att bedöma om myndigheternas krav på säkerhet (så kallade gränsvärden) för människors hälsa och miljön är uppfyllda, dels som en måttstock för att jämföra olika anläggningar, tekniska lösningar eller platser. Trovärdiga beräkningar kräver att händelser och processer i ekosystemen beskrivs på ett realistiskt sätt med motiveringar till varför vissa processer är betydelsefulla och varför andra kan uteslutas. Tillståndet i ytnära ekosystem utgör också kemiska, hydrologiska och geologiska randvillkor för det underliggande berget.

Det övergripande målet med forsknings- och utvecklingsprogrammet för ytnära ekosystem är att utifrån en vetenskaplig kunskapsbas beskriva de från radiologisk synpunkt viktigaste processerna och företeelserna i ekosystemen. Ytterligare mål är att utveckla metodik och modeller som kan användas för att bedöma långsiktiga radiologiska risker för människor och andra organismer i samband med slutförvaring av använt kärnbränsle och annat radioaktivt avfall. I de följande avsnitten redogör vi i detalj för bakgrunden till det pågående programmet, redovisar nyvunna resultat, samt formulerar riktlinjerna för det framtida forskningsprogrammet för ytnära ekosystem.

27.1 Sammanfattning

Sedan Fud-program 2010 har kunskapen om ytnära ekosystem vuxit och metodiken för att bedöma radiologiska risker har vidareutvecklats. De största framstegen har skett inom ramen för arbetet med att beskriva ekosystemen på platserna, säkerhetsanalysen SR-Site och den pågående säkerhetsanalysen av SFR (SR-PSU). SKB har utvecklat konceptuella och numeriska modeller som beskriver ekosystemen och transporten av vattenburna ämnen i ytnära ekosystem. Modeller för vegetationsutbredningen på land och i havet och för yhydrologiska flöden har validerats genom jämförelser med fältdata. Beskrivningen av platserna har kompletterats med modeller för landskapsutveckling och ekosystemsuccession under olika antaganden om framtida klimat och markanvändning. Metodiken för att beräkna transport och ackumulation av radionuklider i landskapet, och för att bedöma risken för människors hälsa och för miljön, har också utvecklats. Beräkningarna bygger i stor utsträckning på befintlig kunskap om Forsmark och Laxemar-Simpevarp.

Resultaten har publicerats i fortsatt hög takt, med drygt 40 SKB-rapporter och runt 30 vetenskapliga artiklar sedan Fud-program 2010. Flera av publikationerna sammanfattar de mångåriga programmen för platsundersökningar och säkerhetsanalys. Ett specialnummer av den vetenskapliga tidskriften *Ambio* (2013, vol. 42:4), med 14 vetenskapliga artiklar som rör SKB:s arbete i ytnära ekosystem, har publicerats. Dessutom har resultaten presenterats på konferenser, seminarier och universitetskurser.

Forskning och utveckling under den kommande programperioden bygger vidare på de pågående aktiviteterna och innefattar studier för att öka processförståelse, samt utveckling av beräkningsmetodik. Stor vikt kommer att läggas vid frågeställningar och osäkerheter som identifierats i pågående säkerhetsanalyser, samt förberedelser för analys av det kommande förvaret för långlivat avfall, SFL. Nya insatser planeras för att förbättra beskrivningen av akvatiska och terrestra ekosystem och övergången mellan dem i ett landskap under utveckling och mänsklig påverkan.

27.2 Utgångspunkter för beskrivning och modellering av ytnära ekosystem

En central del i SKB:s forskningsprogram för ytnära ekosystem har alltsedan slutet av 1990-talet varit att identifiera, beskriva och kvantifiera processer som ur ett radiologiskt perspektiv kan vara viktiga. Angreppssättet är systemekologiskt, där hänsyn tas till både biotiska och abiotiska processer i ekosystemen. En säkerhetsanalys för ett slutförvar görs för långa tidsperspektiv och varierande miljöer, vilket ofta kräver generalisering av kunskaper som genererats inom den akademiska världen.

I forskningsprogrammet uppdateras kunskapen om de viktigaste processerna kontinuerligt med aktuella forskningsrön och slutsatser från SKB:s egna undersökningar. Resultaten från platsundersökningarna i Forsmark och Laxemar-Simpevarp har starkt bidragit till att öka förståelsen av viktiga processer i ytnära ekosystem (Lindborg 2008, Söderbäck och Lindborg 2009, SKB 2010t). Dessutom sker en aktiv kunskapsåterföring från tidigare säkerhetsanalyser och den samlade kunskapen tillämpas sedan på den tids-, rums- och detaljeringsnivå som krävs i kommande säkerhetsanalyser.

Varje ekosystem (hav, sjö, våtmark) karakteriseras av ett stort antal processer och komplexa interaktioner. I en säkerhetsanalys är det dock få processer som spelar en kvantitativt avgörande roll. Därför kan den numeriska modell som används i säkerhetsanalysen avsevärt förenklas och anpassas till ett lämpligt tids- och rumsperspektiv. Genom att använda ett systematiskt tillvägagångssätt för att identifiera de processer som är viktiga för stråldos till människa och andra organismer, kan modellen förenklas och förenklingarna motiveras. Ett sätt att göra det är att upprätta en interaktionsmatris (Hudson 1992). I en interaktionsmatris delas det aktuella systemet upp i olika delar, ytnära ekosystem delas därmed upp i både abiotiska (till exempel kvartära avlagringar, vattenkemi och ytvatten) och biologiska komponenter (till exempel primärproducenter och konsumenter). Därefter identifieras interaktioner mellan systemets olika delar och dessa bedöms med utgångspunkt från den potentiella betydelsen för dos till människa eller miljö.

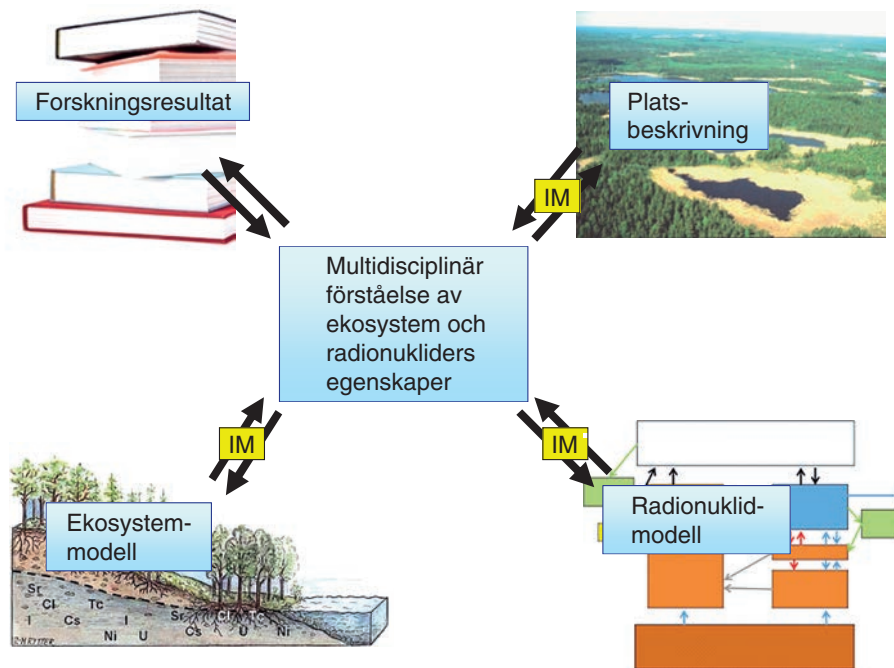
En interaktionsmatris för biosfären utvecklades av SKB i början av 2000-talet (Kautsky 2001). Biosfärsmatrisen har utgjort ett viktigt verktyg vid utformningen av platsundersökningsprogrammen och av ekosystemmodellerna. Vid granskningar av tidigare Fud-program har dock SSM (eller dåvarande SSI) ansett att det varit en brist att det saknades en samlad beskrivning av processer som är relevanta för att ta fram de modeller som används för att beräkna doser i säkerhetsanalyser.

Baserat på den generella interaktionsmatrisen har sedan Fud-program 2010 ekosystemspecifika interaktionsmatriser tagits fram för limniska (Andersson 2010), marina (Aquilonius 2010) och terrestra (Löfgren 2010) ekosystem. I det arbetet har kunskaperna från platsen använts tillsammans med vetenskaplig litteratur för att stämma av att samtliga processer som identifierats som viktiga i interaktionsmatrisen även inkluderats i radionuklidtransportmodellerna. Definitioner och beskrivning av processerna som ingår i matrisen har presenterats i en egen rapport (SKB 2010u).

De tre olika komponenterna, platsbeskrivning, mekanistiska ekosystemmodeller och modeller för radionuklidtransport, utgör tillsammans med resultat från olika forskningsprojekt de viktigaste delarna i det långsiktiga, iterativa arbetet med att öka processförståelsen, se figur 27-1.

För att kunna förstå och beskriva transport av radionuklider från ett förvar krävs kunskap om flöden av material som kan fungera som bärare av radionuklider. Den dominerande bäraren av radionuklider är vatten, såväl i förvaret som i berget och i de lösa avlagringarna. Även i ytnära ekosystem har vattnet mycket stor betydelse för transport och spridning av radionuklider. Dessutom kan radionuklider spridas via gasutbyte, samt genom att ämnen tas upp i organismer, vilka i sin tur kan ätas av andra organismer och slutligen av människan. För de flesta radionuklider som skulle kunna komma ut från ett geologiskt förvar är den dominerande doskällan för människor intaget via mat eller, i vissa fall, vatten.

En vanlig metod inom ekologi och fysiologi är att generalisera födokedjan genom att beskriva flöden mellan organismer med hjälp av organiskt kol (kgC) eller energi (kJ eller kcal). Detta gör det enkelt att upprätta ekosystembudgetar, där den totala konsumtionen balanseras mot summan av tillväxt och förluster i avföring eller metabolism. Samma angreppssätt har SKB valt för att illustrera flöden av organiskt material i ekosystem, inklusive de flöden som slutar i mat till människan eller andra organismer.



Figur 27-1. En illustration av det långsiktiga, iterativa arbetet med att identifiera och utveckla förståelsen för viktiga processer i ytnära ekosystem. En första version av interaktionsmatrisen (IM) utgjorde ett viktigt underlag för utformningen av platsundersökningsprogram, och av ekosystemmodeller och modeller för radionuklidtransport. Var och en av de olika komponenterna genererar ny kunskap och nya frågor som används för att utveckla de övriga komponenterna. Den samlade kunskapen (centralt i bilden) återfinns i rapporterna som beskriver respektive ekosystemen (Andersson 2010, Aquilonius 2010, Löfgren 2010).

Det organiska materialet utgör bärare av radionuklider och uttrycks i den gängse enheten kilogram organiskt kol (kgC). Detta betyder att det organiska kolet i första hand är bärare av radionuklider och inte en analog till radionuklider. Sekundärt är dessutom kol en bra analog till många ämnen som lätt binds i organiska molekyler (till exempel kol-14, jod, kväve och fosfor) eller sorberar till organiskt material. Andra fördelar är att resultat från platsundersökningarna är betydligt lättare att jämföra med andra ekologiska studier, samt att variabiliteten minskar då enheten kgC används i stället för till exempel färskvikt.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

Tyngdpunkten i beskrivningen av ytnära ekosystem i Fud-program 2010 låg på att tillämpa radiologisk processkunskap i säkerhetsanalysen SR-Site med utgångspunkt främst från resultaten av platsundersökningarna i Forsmark och Laxemar-Simpevarp. En genomgång av den aktuella vetenskapliga litteraturen skulle enligt planerna löpa parallellt med detta arbete. Vidare identifierades behovet av att vidareutveckla de modeller som används för att bedöma radiologisk risk med utgångspunkt från transport, ackumulation och biologiskt upptag. Målet för utvecklingen var en metodik som kan beskriva hur människor och miljö exponeras för samtliga relevanta radionuklider. Metodiken ska också spegla aktuell kunskap från de undersökta platserna med avseende på landskapsutveckling och människans bruk av naturresurser. En omfattande känslighetsanalys av modelleringsresultaten planerades, liksom en förbättrad beskrivning av permafrostförhållanden på undersökningsplatserna. Programmet betonade också vikten av ett fortsatt nationellt och internationellt samarbete, samt betydelsen av att sprida nyvunnen kunskap genom vetenskaplig publicering och aktivt deltagande i konferenser och seminarier.

Vid granskningen av Fud-program 2010 ansåg SSM att behovet av insatser inom säkerhetsanalysen för låg- och medelaktivt avfall är stort. Vidare var det oklart för myndigheten hur insamlade data för kolförråd och -flöden i olika terrestra ekosystem kan användas för icke kolrelaterade radionuklider. SSM ansåg att SKB bör samla platsdata inte bara från dagens valda plats, utan även från platser där

data kan representera egenskaper hos flera tiotusen år gamla ekosystem. Dessutom efterlyste SSM en mer systematisk metodik för att välja ut de K_d -värden (vilka beskriver fördelningen av ämnen mellan fast och löst fas) som används i säkerhetsanalysen.

SSM såg positivt på det arbete som pågår på Grönland och ansåg det viktigt att resultaten från detta arbete tillämpas på befintliga och planerade slutförvarsanläggningar i Forsmark, till exempel för att konceptualisera flödesmodeller under perioder med inlandsis och permafrost. SSM ansåg vidare att grundvattenutströmning under havsytan bör beaktas, samt att en bättre underbyggd extrapolering av den nutida hydrologiska modellen till framtida förhållanden behövs. När det gäller modellverktyg ansåg SSM att SKB bör ha tillgång till flera modellverktyg som kan implementeras, så att modellens syfte i säkerhetsanalysen uppnås på bästa sätt. Myndigheten efterlyste också en integration av konsekvensanalysen för biosfären och geosfären.

Kärnavfallsrådet efterlyste i sin granskning av Fud-program 2010 en mer omfattande redogörelse för innehållet i de forskningsprogram som planeras kring terrestra och akvatiska ekosystem.

Kungliga Vetenskapsakademien fann att det forskningsprogram som presenterades i Fud-program 2010 allmänt sett uppvisar högre vetenskapliga kvalitéer än tidigare program, men att det dock fortfarande fanns utrymme för förbättringar.

Program

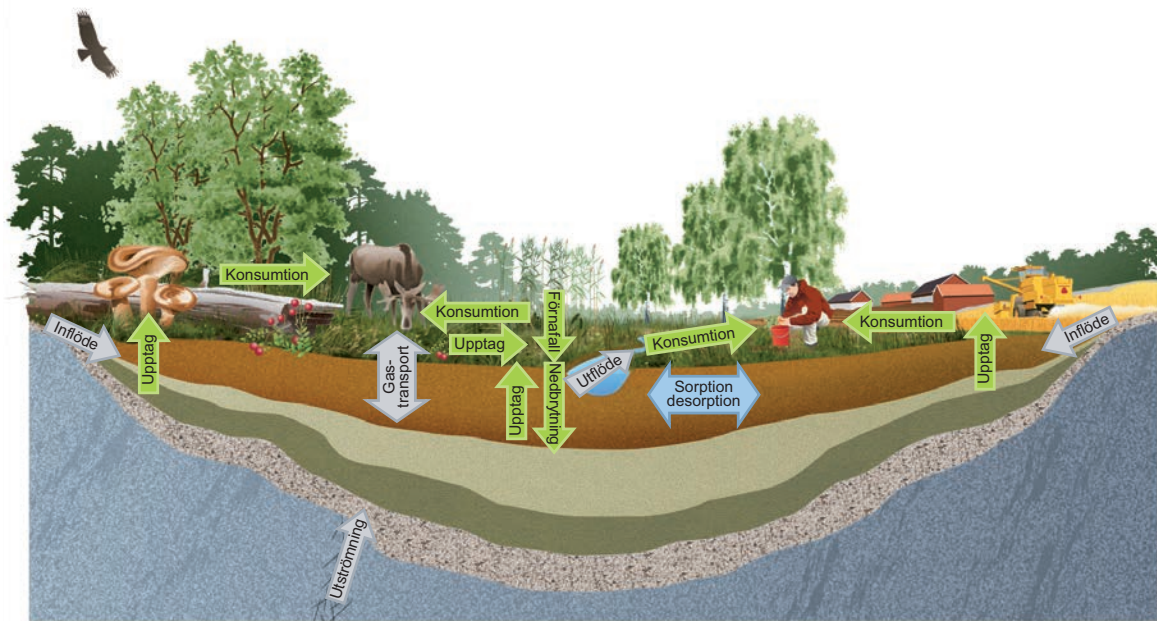
För planeringen av forskning och utveckling när det gäller ytnära ekosystem under den kommande programperioden har SKB utgått från slutsatserna i Fud-program 2010 och från myndigheternas kommentarer på programmet, samt från insikter från platsbeskrivningen, säkerhetsanalysen SR-Site, den pågående granskningen av SR-Site, samt det pågående arbetet med SR-PSU och SFL-programmet. Forskningsprogrammet för ytnära ekosystem har utformats med tanke på de krav som kommande säkerhetsanalyser av såväl driftsatta som planerade förvarsanläggningar kommer att ställa på beskrivningen av transport och ackumulation av radionuklider i ytnära ekosystem. Programmet redovisas i följande avsnitt för respektive ämnesområde.

27.3 Terrestra ekosystem

SKB:s beskrivning av de terrestra ekosystemen omfattar områden där grundvattenytan ligger under eller nära markytan under en stor del av året. De terrestra ekosystemen spänner alltså över många olika biotoper, från väl-dränerad jordbruksmark, över torrare och fuktiga skogstyper, till våtmarker. Djupt grundvatten når de övre jordlagren framför allt i landskapets lågpunkter och når därför oftast våtmarker.

Radionuklider som transporteras med grundvattnet kan tas upp i växter, huvudsakligen via rötterna och kan därmed ackumuleras i biomassa. Denna biomassa utgör för flertalet radionuklider den viktigaste exponeringskällan för människor och växtätande djur. Sekundärt sker även en ackumulation av vissa radionuklider i den övre delen av jordprofilen via rot- och fallförna. Ackumulation av organiskt material, och av radionuklider associerade till detta, blir störst i våtmarker där det periodvis råder mer eller mindre syrefria förhållanden, vilket förhindrar nedbrytning och orsakar torvbildning. Radionuklider kan även sorberas i våtmarker när grundvattnet passerar igenom dessa, se figur 27-2.

Arbetet med platsundersökningar och platsmodellering i Forsmark och Laxemar-Simpevarp har resulterat i en rad nya insikter om omsättning och ackumulation av organiskt material, och om fördelning av element i de terrestra ekosystemen (finns sammanfattade i Löfgren 2010). I figur 27-2 återges de viktigaste processerna för transport och ackumulation i myren och i den angränsande uppodlade myren. Därefter har fortsatt arbete publicerats i separata rapporter, och ytterligare rapporter planeras i samband med säkerhetsanalysen inför den planerade utbyggnaden av SFR, SR-PSU.



Figur 27-2. En beskrivning av viktiga flöden och processer som påverkar ackumulering av ämnen i en våtmark och i den angränsande uppodlade våtmarken där mänsklig exponering står i centrum (Löfgren 2010). Grön färg på pilarna indikerar biotiskt styrda flöden, grå färg vatten- och gasflöden, blå färg representerar sorptions- och desorptionsprocesser. Konsumtion inkluderar dricksvatten. Myren föregicks av ett havsstadium följt av ett sjöstadium, vilket indikeras med förekomst av lergyttja och postglacial lera under torvavlagringarna.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 identifierades behovet av en utökad beskrivning av egenskaper som karakteriserar våtmarker över en tänkt successionsgradient från kust till inland. Programmet uttryckte också en ambition om riktade studier av våtmarker som gränsar till sjöar. Vidare fanns en ambition att närmare undersöka hur radionuklider tas upp i grödor, eftersom förtäring av kontaminerade jordbruksgrödor utgör en viktig källa för mänsklig exponering för många radionuklider, se avsnitt 27.9 Radionuklidmodellering. Kärnavfallsrådet ansåg i sin granskning att kunskaperna om jordbruksmarken bör fördjupas med särskild hänsyn till framtida uppodling av tidigare ackumulationsbottnar i vattendrag, sjöar och hav, samt till människans nyttjande av myrmark.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

I Löfgren (2010) sammanfattades kunskapen om hur de terrestra ekosystemen på de undersökta platserna fungerar. Kunskapen är baserad på en syntes av resultaten från platsundersökningar och platsmodellering, tillsammans med och en tillämpning av vetenskaplig allmän förståelse av terrestra ekosystem från vetenskaplig litteratur till förhållandena på de undersökta platserna, se figur 27-1. Dessutom presenterades konceptuella och kvantitativa terrestra ekosystemmodeller, tillsammans med viktiga data samt en beskrivning av parametrar som använts i säkerhetsanalysen SR-Site. Rapporten utgör den viktigaste processrapporten när det gäller beskrivningen av terrestra ekosystemprocesser och kommer vara grundstenen för uppdateringar av kunskapsläget inför kommande säkerhetsanalyser.

I den pågående säkerhetsanalysen SR-PSU har flera studier med fokus på kol-14 utförts. I en studie undersöktes koncentrationer av löst oorganiskt kol (DIC) och löst organiskt kol (DOC) i myrar belägna på olika höjd över havet nära Forsmark (Löfgren 2011). De undersökta myrarna representerar därmed en ålderssekvens, där DIC-koncentrationen minskade med myrens ökande ålder, med lägst halt i den högst belägna myren. DIC-halten var också positivt relaterad till pH och elektrisk konduktivitet, där en hög konduktivitet indikerar en högre koncentration av kalciumkationer (Ca^{2+}). Högre koncentrationer av kalciumkationer är typiskt för kalkpåverkat grundvattnen. Omvänt var DOC-halten högst i den högst belägna, äldsta myren. Båda dessa mönster kan förklaras av lägre

vattenomsättning och urlakningsprocesser i omgivande tillrinningsområde. Provtagningarna gav också koncentrationer av naturligt förekommande oorganiskt kol (DIC) i myrvattnet som är väsentligt för att beräkna koncentrationen av kol-14 i radionuklidmodellen.

För att kunna bedöma säkerheten av nuvarande och framtida slutförvar där kol-14 förväntas utgöra den största risken för människan och miljön är det viktigt att förstå hur kol omsätts i utströmningsområden för djupt grundvatten. Koldioxid kan tas upp av växter via fotosyntes, och därmed ackumuleras i de akvatiska och terrestra födoavävarna, medan metan och svårnedbrytbara organiska kolföreningar har sämre förutsättningar för biologisk ackumulation. För att kartlägga det nuvarande kunskapsläget med avseende på kolförråd och kolomsättning i våtmarker inleddes en litteraturgenomgång i samarbete med Sveriges lantbruksuniversitet i Uppsala. Resultaten av litteraturgenomgången kommer att presenteras inom SR-PSU-rapporteringen.

Flera radionuklider visar de högsta dosomvandlingfaktorerna för mat som kommer från lokala odlingar. För att ytterligare belysa olika aspekter av våtmarkers betydelse som potentiell jordbruksmark startades under 2012 ett samarbetsprojekt med Sveriges geologiska undersökning, SGU. Myrars succession, horisontella expansion och den historiska användningen beskrevs från befintliga torvprofiler i norra Uppland. Preliminära resultat visar att hälften av myrarna har sediment från ett tidigare sjöstadium. Den andra hälften har sediment från havsfasen utan sjöstadium. Inga av de uppodlade myrarna var direkt underlagrade av morän, vilket stödjer den nuvarande landskapsutvecklingsmodellen, se avsnitt 27.8 Landskapsutveckling och avlagringar. I studien beräknas också hur snabbt dränerad torv kompakteras och oxideras, vilket är av betydelse för frisättning och omsättning av radionuklider vid uppodling och avgörande även för dessa jordars förmåga att fungera som jordbruksmark under begränsade tidsperioder.

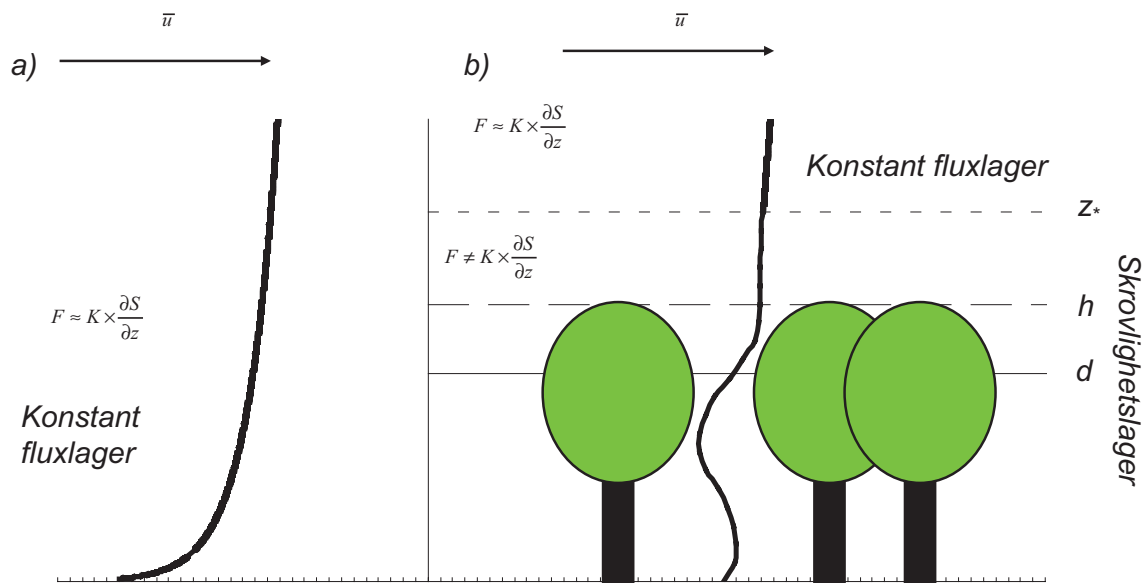
På platser där kol ackumuleras i landskapet finns också potential för ackumulation av många andra ämnen. I en studie inom Krycklanprojektet (stort projekt för att integrera studier av vattenkvalitet, hydrologi och akvatisk ekologi i ett avrinningsområde i Västerbotten) studerades hur naturligt förekommande uran och torium ackumuleras i våtmarker inom avrinningsområden (Lidman et al. 2012) och mer specifikt hur uran, torium och radium ackumuleras inom en myr i ett skogslandskap (Lidman et al. 2013). Studierna visar att cirka 60–70 procent av det uran och torium som når myren också fastläggs där, och skillnader i koncentrationer mellan de tre radionukliderna inom myren berodde på grundvattenflöden in i myren. Troligen beter sig andra ämnen som binds starkt till organiskt material på liknande sätt.

Ett examensarbete vid Stockholms universitet har studerat hur koncentrationsfaktorer påverkas av växterna och marken de växer i (Raguž et al. 2013).

För att förstå hur flyktiga ämnen (kol-14, jod-129) transporteras i atmosfären har en genomgång av turbulent transport i atmosfären gjorts i samarbete med Lunds universitet, se figur 27-3 (Tagesson 2012). Förutom en processbeskrivning visades också hur vissa viktiga parametrar, som till exempel diffusivitet i luftlagren, kan skattas utifrån mätningar av temperaturprofil och vindhastighet. Studien utgjorde grunden för den omarbetade beskrivningen av den marknära atmosfären i säkerhetsanalysen SR-PSU, där koncentrationer av kol-14 används för att beräkna exponering av människor och andra organismer, se avsnitt 27.9 Radionuklidmodellering.

När doser till andra organismer än människan beräknas behövs data om utbredningen och mängderna av olika djur och växtgrupper. Data hämtas från platsundersökningarna, samt från pågående miljöövervakning. Miljöövervakningen har fortsatt följt däggdjurs- och fågelpopulationer i Forsmark och Laxemar-Simpevarp (Green 2010, 2011, Truvé 2012). De flesta populationer har varit stabila mellan inventeringstillfällena. Flera rovdjur, såsom lo, räv och utter, har emellertid ökat i antal, vilket även gäller vildsvinspopulationen (Truvé 2012). Jaktstatistik har använts för att följa utvecklingen av älgpopulationen och där finns nu ett stort underlag för att följa effekter av till exempel förändringar i jaktryck eller etablering av varg (Cederlund och Broman 2010a, b, 2011a, b, Cederlund et al. 2012a, b).

I samband med bygge av Kärnbränsleförvaret i Forsmark kan det bli aktuellt att återskapa eller nyskapa våtmarker i området. För att öka förståelsen för viktiga processer vid våtmarksrestaurering har en studie genomförts som bland annat innefattar tidigare utdikade torvmarker i närheten av Forsmark (Hedberg et al. 2012).



Figur 27-3. En konceptuell beskrivning av gasflöden i det konstanta fluxlagret och skrovlighetslagret, där F beskriver ett flöde som en funktion av en tillståndsvariabel (S) och höjden (z), samt eddydiffusionskoefficienten (K). \bar{u} är en medelvärdesbildad vindprofil ovanför kort vegetation (a), och ovanför och under det så kallade skrovlighetslagret i en skog (b). (Tagesson 2012, figur 4-1)

Program

De senaste årens nyvunna kunskap bekräftar att om utsläpp av radionuklider skulle ske till de terrestra ekosystemen så är lågpunkter i terrängen där våtmarkerna finns den troligaste recipienten, se avsnitt 27.6 Hydrologi och transport. SKB kommer därför att genomföra ytterligare studier för att fördjupa förståelsen när det gäller transport och ackumulation av radionuklider i våtmarker och jordbruksmarker. Kunskapen kommer att användas för att uppdatera SKB:s radionuklidmodell, och för att minska osäkerheter i beskrivningen av nyckelfaktorer vid dessa beräkningar.

SKB kommer att fortsätta med det långsiktiga arbetet som syftar till att ersätta eller komplettera koncentrationsfaktorerna för organismer med mekanistiska modeller. För landväxter styr omsättningen av organiskt material (primärproduktion och nedbrytning), näringsämnen (analogier till radionuklider) och vatten (transpiration eller upptag i rötter och blad) upptaget av radionuklider. Processförståelsen och modellering av processerna i terrestra ekosystem kommer att kombineras med biogeokemiska platsdata (se avsnitt 27.5 Biogeokemi), för att modifiera radionuklidmodellerna vilka beskrivs i avsnitt 27.9 Radionuklidmodellering. Speciellt fokus kommer läggas på rotupptag, där kunskaperna från Coup-modellen (Gärdenäs et al. 2009) och tidigare skogsmodeller (Avila 2006) tillämpas, kompletterat med nyvunna kunskaper om bevattning av gröda. Dessutom kommer betydelsen av gastransport, till exempel metan och koldioxid, i mark och atmosfär att belysas, tillsammans med upptagsprocesser av gas genom primärproduktion och mikrobiell metabolism.

I terrestra ekosystem förändras markkemiska egenskaper när jordmån utvecklas under långa tider. Vissa ämnen urlakas medan andra anrikas, och det sker en successiv urlakning av viktiga ämnen i marken, vilket kan ge förändrade förutsättningar för sorption av radionuklider i marken. För att belysa successionens och ålderns betydelse för olika markkemiska egenskaper kommer befintliga platsdata, kompletterade med fältinsamlingar i en åldersgradient av lämpliga avrinningsområden från kust till inland, att analyseras. Detta kommer att kombineras med studier av transport av ämnen mellan myr och sjö, se avsnitt 27.4 Akvatiska ekosystem, där lätttrörliga ämnen som till exempel kalciumjoner, magnesiumjoner, DOC, POC (partikulärt organiskt kol), DIC och inerta ämnen som rubidium, zirkonium och titan, kommer att studeras i profiler genom landskapet. Dessa studier kommer att fördjupa förståelsen av ämnestransport och därmed transport av radionuklider från terrestra miljöer till sjöar. Profilerna ger viktigt underlag för att detaljera beskrivningen av transport i ytssystemen. I detta arbete planeras även test av andra verktyg för modellering av ämnestransport, till exempel Comsol, se avsnitt 27.9 Radionuklidmodellering.

Den långlivade radionukliden klor-36 förväntas vara viktig i bedömningen av säkerheten av ett framtida SFL. Synen på klor i naturen är emellertid under förändring. Klorid, som tidigare har betraktats som den dominerande formen, har visat sig vara reaktiv, och mängden organiskt klor är i många miljöer betydligt högre än mängden lättlöslig klorid. Omsättningen av klor i terrestra ekosystem påverkas i hög grad av biologiska processer som upptag i vegetation och klorering av organiskt material i till exempel ytliga jordlager. Regleringen av klorerings- och dekloreringsprocesser, och hur dessa påverkar transport under olika miljöförhållanden är emellertid till stor del okänd. SKB planerar därför en fördjupad utvärdering av klorets fördelningsmönster i terrestra ekosystem på de undersökta platserna, med målsättningen att knyta det observerade mönstret till processer och egenskaper i mark och vegetation. Arbetet kan komma att kräva kompletterande platsdata, se avsnitt 27.5 Biogeokemi, och eventuella modelleringsinsatser.

Våtmarker kan expandera från forna sjöbassänger med påföljande försumpning och ytterligare torvtillväxt i omgivande område. Den areella utbredningen av kärr och mossar avgörs främst av nederbörd och topografi, och därmed kan den horisontella torvtutbredningen i ett flackt landskap påverkas av ändrade klimatbetingelser. Torvtutbredningen påverkar i sin tur var det finns odlingsbar mark, vilket är av betydelse för dosberäkningarna. Torvtutbredningen i ett kallare klimat (till exempel Grönland) kommer därför att jämföras med utbredningen i Forsmark för att förstå hur torvtutbredningen förändras i ett framtida landskap i Forsmark.

27.4 Akvatiska ekosystem

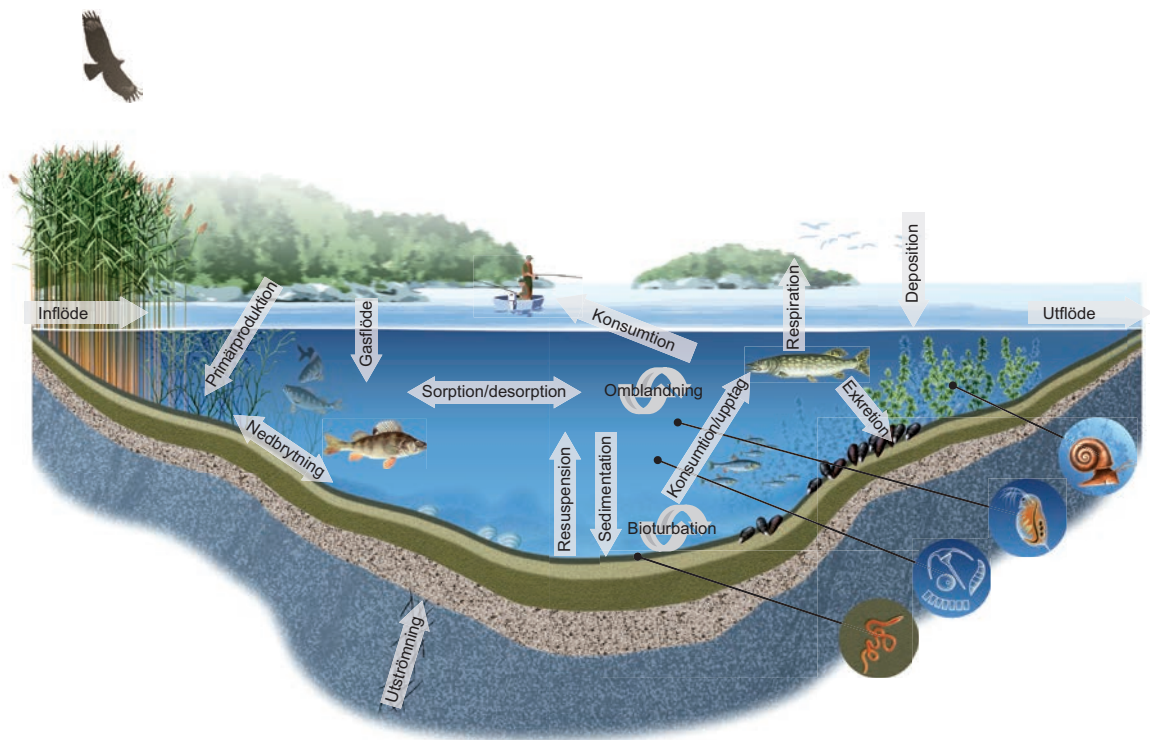
De akvatiska ekosystemen utgörs av vattendrag, sjöar och hav. Dessa är normalt belägna i lågpunkter i landskapet och utgör därmed potentiella utströmningsområden för djupt grundvatten som skulle kunna bli kontaminerat av radionuklider från ett slutförvar, se avsnitt 27.9 Radionuklidmodellering. Dessutom sker den huvudsakliga ämnestransporten i biosfären med hjälp av vatten, vilket gör att så gott som alla rörliga ämnen som finns i det terrestra systemet förr eller senare kommer att hamna i ett akvatiskt system. Därför kommer akvatiska system att vara centrala när det gäller att bedöma effekter av att radionuklider skulle kunna komma att släppas ut från ett slutförvar. Radionuklider som når ett akvatiskt system kan tas upp av organismer, bindas in i sedimenten, avges till atmosfären eller transporteras vidare nedströms. Upptag av radionuklider i akvatiska organismer utgör en exponeringsväg för dos till människa i och med att akvatiska organismer av olika slag utgör föda. I figur 27-4 återges de viktigaste processerna för transport och ackumulering i sjöar.

I många fall kommer potentiella utströmningsområden för radionuklider från ett förvar att passera ett sedimentlager. Sedimentens genomsläpplighet påverkar spridnings- och spädningmönster, och adsorptionsprocesser gör att olika ämnen kan komma att ackumuleras i sedimenten. För vissa radionuklider kan vi alltså förvänta oss en betydligt högre koncentration i sediment än i vatten, och sediment kan utgöra en viktig exponeringsväg för vattenlevande organismer. Kortsiktigt kommer ackumulering i sediment troligen att minska utflödet av radionuklider till vattenmassan och ge lägre exponering för människor. Långsiktigt kan däremot tidigare ackumulerade radionuklider frisättas i samband med till exempel resuspension eller landhöjning/uppodling och ge förhöjda doser under begränsade perioder.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 planerade SKB för fortsatt utveckling av modeller för transport och ackumulering av radionuklider i akvatiska system genom ett doktorandarbete, samt att man skulle vidareutveckla successionsmodellen avseende övergång från marina till limniska system. Inför SR-Site planerades att den tillgängliga kunskapen från platserna skulle sammanställas i en rapport om sjöar och vattendrag, och i en rapport om havet. En vidareutveckling av dosmodeller för sjöar planerades, liksom en specialstudie av våtmarker vid kanten av sjöar med avseende på interaktioner mellan sjöar och omgivande våtmarker, se avsnitten 27.3 Terrestra ekosystem och 27.6 Hydrologi och transport för nyvunnen kunskap.

I kommentarerna på Fud-program 2010 påpekade SSM att SKB bör utvidga studierna av geokemiskt beteende i de akvatiska systemen till att omfatta flera ämnen än kol.



Figur 27-4. Viktiga processer för radionuklidomsättning i akvatiska system, med ett exempel från ett sjöekosystem (Andersson 2010). *Pilarna anger olika processer och deras dominerande riktning. I havet utanför Forsmark är processerna likartade, men i vissa fall dominerar andra organismer. I rinnande vatten är inte alla processer viktiga.*

Nyvetenskap sedan Fud 2010

I SKB:s arbete för att öka förståelsen av viktiga processer i akvatiska ekosystem passerades en viktig milstolpe i och med publiceringen av ekosystembeskrivningarna för havet (Aquilonius 2010) och för sjöar och rinnande vatten (Andersson 2010). Rapporterna sammanfattar resultaten från platsundersökningarna och jämför dessa med resultat från andra studier i Sverige och i världen. Dessutom har modeller för att beskriva viktiga flöden av organiskt kol (se avsnitt 27.2 Utgångspunkter för beskrivning och modellering av ytnära ekosystem) och ett antal andra ämnen utvecklats.

Vattenströmmar i havet har en avgörande betydelse för flöden och ackumulation av olika ämnen under havsperioden och därför har en kompletterande hydrodynamisk modell tagits fram för att beskriva Öregrundsgrepen vattenomsättning under perioden från 6 500 år före Kristus till 9 000 år efter Kristus (Karlsson et al. 2010, Eriksson och Engqvist 2013).

Spridning och upptag av olika ämnen under havsperioden har simulerats för Öregrundsgrepen med två olika mekanistiska modeller, dels en rumsligt och tidsmässigt högupplöst modell, Ecolab (Erichsen et al. 2010), dels den tidigare utvecklade SKB-modellen (Kumblad et al. 2003, Kumblad och Kautsky 2004, Konovalenko et al. 2013). I Ecolab-modellen kopplas en detaljerad beskrivning av ekologiska processer samman med den hydrodynamiska modellen, för att mekanistiskt beskriva flöden av kol, kväve och fosfor i tre dimensioner. I simuleringarna varierade bland annat koncentrationsfaktorer för växtplankton under året och i olika delar av vattenmassan. En jämförande studie av de båda modellerna (Erichsen et al. 2013) visar att den tidigare SKB-modellen är grövre men snabbare, men att resultaten är rimligt överensstämmande mellan modellerna. Båda modellerna gav konfidensintervall för modellerade värden för koncentrationsfaktorer, vilket är en klar förbättring mot tidigare använda modeller. Modellerna kan framöver användas som verktyg för att undersöka i vilken utsträckning olika organismer påverkas av utsläpp till marina ekosystem.

Förståelsen för hur stabila grundämnen och radionuklider fördelar sig i de marina bassängerna i Forsmarksområdet har utökats genom den modellering som utförts inom ett doktorandarbete (Konovalenko 2012, Erichsen et al. 2013, Konovalenko et al. 2013). En studie av den kemiska sammansättningen (stökimetri) i olika organismer och organiskt material i kustekosystemet i Forsmark har genomförts genom analys av 48 olika grundämnen (Bradshaw et al. 2012). I denna studie visas med hjälp av modellering, styrkan av att använda sig av stökimetri för att modellera transport av ämnen i födoväven. Utöver detta har massbalanser på landskapsnivå beräknats för ett stort antal ämnen inom ramen för SR-Site. En diskussion om vad som påverkar transporten av dessa ämnen (inklusive tidsskalor) finns redovisade i Tröjbom och Grolander (2010). Massbalanser för kol och andra ämnen i enskilda sjöar (Andersson 2010) och marina bassänger (Aquilonius 2010) har också beskrivits.

Studier i Krycklanområdet har gett kunskaper om flöden av ämnen i vattendrag och myrsystem. Vattenflöden och avrinningsområdenas sammansättning styr tillförseln av terrestert kol till vattendragen i Krycklanområdet (Laudon et al. 2011). Löst organiskt material kan tas upp i födoväven via bakterier, och flöden av löst organiskt kol från terrestra till akvatiska ekosystem kan ha stor betydelse för de akvatiska systemen (Laudon et al. 2011). Andra viktiga ämnen som studerats i Krycklan är selen, uran och torium, vars dynamik i vattendrag diskuteras i (Lidman et al. 2011, 2012).

Kunskapen om landskapets succession och effekterna på ekosystemen när dessa går från marina till limniska system på grund av landhöjningen har utökats genom en kunskapssammanställning (Hansen 2012). Denna studie täcker in effekter på vegetation och djur samt effekter på vattentemperatur, vattenomsättning och salthalt. SKB har tidigare utvecklat en modell som beskriver successionen när havsvikar isoleras och bildar sjöar, och den därpå följande igenväxningen av sjöar till våtmarker (Brydsten 2006). Modellen, som bygger på empiriska samband, har därefter vidareutvecklats under arbetet med SR-Site. Etableringen av vass har visat sig ha stor betydelse för när och med vilken hastighet bassängerna växer igen. En kompletterande studie av vass har utförts för att kunna uppdatera modellen så att den bättre hanterar igenväxningen (Strömgren och Lindgren 2011).

Förutom att vass fungerar som ett steg i igenväxningen av marina bassänger och sjöar, är vattenväxter (till exempel kransalger, ålnate) viktiga i SKB:s radionuklidtransportmodeller då upptag av vissa radionuklider, såsom kol-14, antas ske genom växternas fotosyntes. SKB har under platsundersökningarna i Forsmarksområdet utfört flera studier som rör förekomst, biomassa och produktion av vattenväxter i akvatiska system i Forsmarksområdet, vilket har sammanfattats i de limniska och marina ekosystembeskrivningarna (Andersson 2010, Aquilonius 2010). Sedan dess har fältundersökningar gjorts för att validera den marina vegetationsmodellen (Aquilonius et al. 2011), samt för att komplettera biomasseuppskattningar i vattendrag (Andersson et al. 2011).

Utöver tidigare undersökningar av sjöar i Forsmarksområdet har kompletterande studier av fyra gölar genomförts. Gölarna visar en liknande vattenkemi som sjöarna, vilket betyder att de är väl buffrade och uppvisar högt pH-värde och höga kalciumkoncentrationer (Qvarfordt et al. 2010, 2011).

Processförståelsen när det gäller sjöar i ett permafrostlandskap utökas genom undersökningarna av sjöar i Kangerlussuaq på Grönland. Sammanställning av data pågår och kommer att avrapporteras under de kommande åren, se vidare avsnitt 27.7 Effekter av långtidsvariationer.

Program

Som nämnts ovan har SKB utvecklat mekanistiska ekosystemmodeller för akvatisk miljö, där de ingående flödena styrs av primärproduktion, konsumtion, respiration och nedbrytning. Enheten för beskrivningen är organiskt kol, vilket representerar energin som omsätts i till exempel föda. Omsättning och ackumulering av andra ämnen i näringsväven beskrivs dynamiskt som en funktion av växtupptag, adsorption, konsumtion och exkretion, med hänsyn till organismernas näringsbehov och de olika ämnens egenskaper. SKB kommer att stödja den fortsatta utvecklingen av dessa modeller, med målsättningen att beskriva omsättning och ackumulering av radionuklider i organismer och organiskt material i hav och sjöar, samt i angränsande våtmarker. Modellbeskrivningar kommer att valideras med redan insamlade fältdata från Forsmark. Fortsatt utveckling av dessa modeller kommer att ske i det pågående doktorandarbetet vid Stockholms universitet (Konovalenko 2012), och arbetet kommer att fokusera på utveckling av sjömodellerna.

Studierna i Krycklanområdet antyder, tillsammans med annan vetenskaplig litteratur, att terrestrert organiskt kol kan vara av stor betydelse i den akvatiska födoväven då det tas upp av bakterier och förs vidare upp i näringsväven (Hessen och Tranvik 1998, Jansson et al. 2000, Berggren et al. 2010, Laudon et al. 2011). Detta innebär en utspädningsfaktor med avseende på kol-14 i den akvatiska födoväven, då dagens modeller enbart bygger på akvatiska växters (inklusive algers och bakteriers) produktion, där oorganiskt kol-14 i vattnet tas upp i primärproducenterna och transporteras vidare i födoväven. För att undersöka den potentiella betydelsen av denna utspädning av kol-14 i sjöar i Forsmarksområdet planeras kompletterande fältundersökningar och modellering.

I den tidigare säkerhetsanalysen för SFR, SAR-08, erhöles den högsta dosen till människor från fisk i sjöar. Provfiske har skett i både sjöar och kustområden i Forsmarksområdet och fiskvandring har mätts i ett vattendrag (Andersson 2010, Aquilonius 2010). För att kunna användas i modelleringen av radionuklidtransport måste provfiskeresultaten omvandlas till biomassa per area och produktion per area, och för detta krävs ett antal omräkningsfaktorer. Dessa omräkningsfaktorer har varit behäftade med stora osäkerheter. Nya studier visar dock att ekolodning skulle kunna ge en säkrare skattning av biomassa per area i vissa typer av sjöar (Emmrich et al. 2012). En översyn av kunskapsläget inom detta område planeras och beroende på resultat därifrån kan eventuella fältkompletteringar i Forsmarksområdet komma ifråga. Översynen ska också täcka in den ökande kunskapen om fiskvandring mellan sjöar och kustbassänger, då även detta kan ha påverkan på de ekosystemmodeller och massbalanser som SKB använder, vilket i sin tur påverkar dosberäkningar.

27.5 Biogeokemi

Studier av koncentrationer av olika ämnen i det ytliga systemet, det vill säga biogeokemin, kan ge grundläggande information om ämnenas förekomst i olika rumsliga skalor, från den storskaliga fördelningen i landskapet till detaljerade beskrivningar av hur ämnena fördelar sig mellan organismer och miljön i ett ekosystem. De flesta grundämnena har relativt konstanta proportioner i organismer. Jämförs fördelningen av grundämnena (stökiometrin) i organismer med den i vattnet och marken kan det ge god ledning om ämnenas ursprung och de processer som styr de storskaliga fördelningsmönstren i naturen. På en mer detaljerad nivå kan samma information användas för att beskriva hur ämnen tas upp och anrikas i terrestra och akvatiska ekosystem.

Fördelningen av ämnen i ytnära ekosystem används för att förstå hur radionuklider transporteras och ackumuleras i miljön. För flera radionuklider förekommer stabila eller långlivade isotoper naturligt, till exempel kol, jod, torium, radium, uran och nickel. För andra radionuklider kan egenskaper hos ett snarlikt stabilt grundämne, till exempel kalium jämfört med cesium-137, eller egenskaper hos en hel ämnesgrupp, till exempel sällsynta jordartsmetaller, ge vägledning om kvantitativt viktiga transport- och ackumulationsprocesser.

I de flesta exponeringsmodeller används ämneskvoter för att beräkna radionuklidkoncentrationer i miljön och upptag i organismer. Fördelningskoefficienter (K_d) beskriver fördelningen av ämnen mellan fast fas och vattenfas, till exempel i avlagringar eller på partiklar i ytvattensystem. Koncentrationsfaktorer eller bioackumulationsfaktorer speglar ett biologiskt upptag som är proportionellt mot koncentrationen i miljön eller födan. Ämneskvoter sammanfattar en mängd olika kemiska, fysikaliska och biologiska processer och antas spegla ett jämviktstillstånd i miljön.

När ämneskvoter för en specifik plats ska skattas från övergripande litteratursammanställningar blir osäkerheten ofta stor, eftersom det är svårt eller omöjligt att relatera litteraturdata till platsspecifika biologiska, kemiska, och fysikaliska förhållanden. I SR-Site utnyttjades platsspecifika uppskattningar av ämneskoncentrationer i möjligaste mån för att beräkna koncentrationsfaktorer och K_d (Nordén et al. 2010).

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 konstaterades att insamlade data ska bearbetas och utvärderas vidare, samt kompletteras med en del ytterligare provtagningar i Forsmark. SSM ansåg i sin granskning att SKB bör ta fram en mer systematisk metodik för att välja ut K_d -värden. Dessutom ansåg SSM att SKB bör studera geokemiskt beteende för fler ämnen än kol, till exempel jod, uran och torium.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

Vid avrapporteringen av SR-Site publicerade SKB en sammanställning av kunskaperna om olika ämnen, baserat på resultat från platsundersökningarna och nyutgiven litteratur (Nordén et al. 2010).

Under platsundersökningsprogrammet har SKB karakteriserat koncentrationer av olika ämnen för avlagringar, porvatten och ytvatten, och för ett stort antal terrestra och akvatiska organismer (Johanson et al. 2004, Engdahl et al. 2006, 2008, Hannu och Karlsson 2006, Roos et al. 2007, Brun 2008, Kumblad och Bradshaw 2008, Grolander och Roos 2009, Sheppard et al. 2009, Tröjbom och Nordén 2010). Den resulterande databasen är unik, både genom mängden ämnesspecifik information insamlad från två välavgränsade geografiska områden, och genom den systematiska och synkroniserade provtagning som ligger bakom platsundersökningarna. Denna biogeokemiska kunskap sammanfattades i rapporteringen inom säkerhetsanalysen SR-Site (Tröjbom och Nordén 2010).

För att beräkna koncentrationsfaktorer till SR-Site användes platsdata i största möjliga utsträckning. SKB uppdaterade tidigare litteratursammanställningar (Karlsson och Bergström 2002) med aktuella data, bland annat från IAEA:s databas (IAEA 2010). Plats- och litteraturdata kombinerades med hjälp av det statistiska verktyget Babar, som utvecklats med stöd från SKB, Posiva, NRPA (Norska Strålevernet) och EDF (Electricité de France). Den metodik som användes för skattning av koncentrationsfaktorer innebar att all tillgänglig information användes, men att data från platsen viktades tyngre än data från andra platser.

Den kemiska sammansättningen av abiotiskt och biotiskt material från en havsvik i Forsmarkområdet har studerats i detalj (Kumblad och Bradshaw 2008). Där undersöktes fördelningen av 48 ämnen i större organismgrupper (växtplankton, djurplankton, bottenlevande mikroalger, makroalger, akvatiska kärlväxter och i flera olika typer av bottenlevande organismer och fisk), samt i löst och partikulärt material i vattnet och i sedimentet. I en vetenskaplig artikel (Bradshaw et al. 2012) visades att den relativa andelen makronäringsämnen, till exempel kväve och fosfor, ökade uppåt i näringsväven, samtidigt som antalet grundämnen som bidrog substantiellt till biomassan minskade. Genom att koppla kvoten mellan kol och andra ämnen till en ekosystemmodell baserad på kolflöden, visades att stökiometriska samband kan förutsäga hur olika ämnen överförs i näringsväven. De flesta obalanser i stökiometrin kunde förklaras av ekologiska eller biologiska processer.

Inför säkerhetsanalysen för utbyggnaden av SFR, SR-PSU, genomfördes ytterligare provtagningar och analyser av bland annat jordbruksmark och grödor (Sheppard et al. 2011, Sohlenius et al. 2013). Porvatten och fast material från fem olika jordtyper som representerar de huvudsakliga avlagringar som kan användas som jordbruksmark i området (lerig morän, glaciärra, lergyttja, och brukad respektive orörd torv) analyserades på grundämnesinnehåll, och resultaten användes sedan för att beräkna K_d -värden. Den kemiska sammansättningen i ax, strån och rötter från säd från flera av dessa lokaler analyserades också och användes tillsammans med jordkemiska data vid uppskattning av koncentrationsfaktorer. Den biogeokemiska informationen från Sheppard et al. (2011) och Sohlenius et al. (2013) har inkluderats i den geokemidatabas som tagits fram inom SR-PSU och som kommer att användas för att ta fram de K_d -värden och koncentrationsfaktorer som används i säkerhetsanalysen för ett utbyggt SFR, SR-PSU.

Inom SR-PSU har platsdata fortsatt prioriterats högst vid framtagande av ämneskvoter. Platsdata från Forsmark har ansetts som mest relevant för att göra en bästa skattning av såväl K_d -värden som koncentrationsfaktorer. Utöver provtagningarna vid platserna har laboratoriemätningar av sorptions-egenskaper hos jordprover genomförts. Sorptionen studerades för sju ämnen, jod, cesium, strontium, nickel, europium, uran och neptunium, i morän, sand, lera, lergyttja, gyttja och torv (Holgersson 2009). Utvärdering av resultaten från dessa studier fortsätter.

Parallellt med utvecklingen av hur platsspecifik information används för att skatta ämneskoncentrationer bedriver SKB långsiktig forskning för att öka processförståelsen av retention och biologiskt upptag för olika ämnen. Ett exempel är det pågående doktorandprojektet i Krycklanområdet, där omsättningen av bland annat selen, uran och torium i boreala system undersökts och där processbaserad modellering av radionuklidretention utvecklats i en serie arbeten, se vidare avsnitt 27.6 Hydrologi och transport. SKB har även använt mekanistiska beskrivningar av de biologiska processer som styr upptag och ackumulering i modelleringsstudier, bland annat för att studera rumslik och säsongsbunden variation av ämneskoncentrationer i en marin näringskedja, se avsnitt 27.4 Akvatiska ekosystem.

Program

Den information som använts för att beskriva ämneskoncentrationer på SKB:s undersökningsplatser är unik. Inom programmet för biogeokemi i ytsystemet kommer insamlade data att fortsätta att bearbetas, för att därigenom öka förståelsen för och förbättra beskrivningen av retention och biologiskt upptag på olika rumsliga skalor.

Trots den stora datamängden råder fortfarande i många fall osäkerheter när det gäller fördelningskoefficienter och bioackumulering för ett antal ämnen som kan vara viktiga ur dossynpunkt i olika säkerhetsanalyser. Ett sådant exempel är radium som mätts i Forsmark, men som bara har gett detekterbara resultat i ett begränsat antal prover från organismer. En utvärdering förväntas ge svar på om existerande data kan användas för att underbygga parametrering av modeller, till exempel genom att använda analoga grundämnen och/eller organismer. Efter en sådan utvärdering kan kompletterande provtagningar behöva genomföras eller en modifiering av övervakningsprogrammet. Viktiga ämnen för kommande säkerhetsanalyser bedöms vara radium, inklusive uransönderfallskedjan, kol, jod, cesium, nickel, molybden och klor. Samtliga dessa ämnen förutom cesium är biologiskt aktiva och för kol, jod och klor påverkar biologiska processer i vilken form ämnena förekommer. Efter utvärdering kommer riktade fältinsatser att göras för att mäta processer som bedöms vara kvantitativt viktiga.

Platsdata för koncentrationsfaktorer skiljer sig ibland från motsvarande värden redovisade i litteraturen (Torudd 2010). Generellt verkar de största skillnaderna förekomma bland de ämnen där litteraturdata bygger på ett fåtal observationer. För terrestra och limniska ekosystem finns en tendens till att platsdata ger lägre koncentrationsfaktorer än litteraturdata, och orsaken till detta kommer att utredas i kommande program. SKB avser att jämföra koncentrationsfaktorer i en salthaltsgradient (sjöar, havsvikar, öppet hav) på de undersökta platserna för att belysa om det finns signifikanta skillnader mellan de olika biotoperna.

Förutom att platsinformation ger underlag för beräkning av koncentrationsfaktorer och K_d -värden är halterna av olika ämnen viktiga för förståelse av olika processer eller interaktioner mellan olika ämnen. Den processbaserade modelleringen utgör ett komplement till eller ersättare av koncentrationsfaktorer och K_d -värden, se vidare avsnitt 27.6 Hydrologi och transport. Därför kommer den fortsatta utvärderingen av platsdata också omfatta viktiga styrvariabler, såsom den abiotiska miljön, koncentration av näringsämnen och artsammansättning, för att ge kvalitetssäkrade data för processmodelleringen, men också för att utvärdera/modifiera miljöövervakningsprogrammet, se avsnitt 27.10 Miljöövervakning.

27.6 Hydrologi och transport

Detta avsnitt beskriver forsknings- och utvecklingsinsatser inom ythydrologi och transport med fokus på aktiviteter kopplade till biosfärsmodelleringens identifikation och beskrivning av biosfärsobjekt i säkerhetsanalysens modeller. Här redovisas således enbart en del av utvecklingen inom ythydrologi och transport. Övrigt utvecklingsarbete tillsammans med motsvarande aktiviteter inriktade på berget beskrivs i avsnitt 26.4 Grundvattenströmning. Utveckling kopplad till beskrivning av retentionsprocesser och reaktiv transport beskrivs också här, medan aktiviteter som direkt syftar till att bestämma K_d -värden redovisats ovan, i avsnitt 27.5 Biogeokemi.

Transportmodellering är en central komponent i såväl dosmodellering som ekosystemmodellering. Dessa modelleringar beskrivs dock separat i andra delar av detta kapitel. När det gäller transport koncentrerar vi oss i detta avsnitt på modelleringar som utförs för att beskriva de undersökta områdena och för att stödja säkerhetsanalysen med processförståelse och parametervärden. Beträffande den hydrologiska modelleringen tas aktiviteter upp som är kopplade till såväl platsbeskrivning och säkerhetsanalys som miljökonsekvensbeskrivning (MKB) i avsnitt 26.4 Grundvattenströmning, medan genereringen av hydrologiska indata till biosfärsmodelleringen beskrivs nedan.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 konstaterades att påbörjade arbeten med att koppla nyvunnen kunskap från Krycklanstudien till SKB:s undersökningsområden fortsätter, liksom den processbaserade modelleringen av advektiv-reaktiv radionuklidtransport med syftet att inkludera fler delar av ytsystemet.

Likaså planerades en fortsättning av arbetet med massbalanser som ett sätt att beskriva och förutsäga ämnens fördelning i landskapet, samt arbetet med att karakterisera utströmningsområdets storlek, lägen och de processer som styr transporten. Dessutom planerades en vidareutveckling av de beräkningsverktyg som används för modellering av hydrologi (vattenflöden) och advektiv transport av lösta ämnen.

Vid granskningen av Fud-program 2010 ansåg SSM att SKB bör integrera konsekvensanalysen för biosfären och geosfären. Vidare delade SSM SGU:s uppfattning att grundvattenutströmning under havsytan bör beaktas vid modelleringar av grundvattenflöde och man ansåg också att SKB bör sträva efter en bättre underbyggd extrapolering av den nutida hydrologiska modellen till framtida förhållanden.

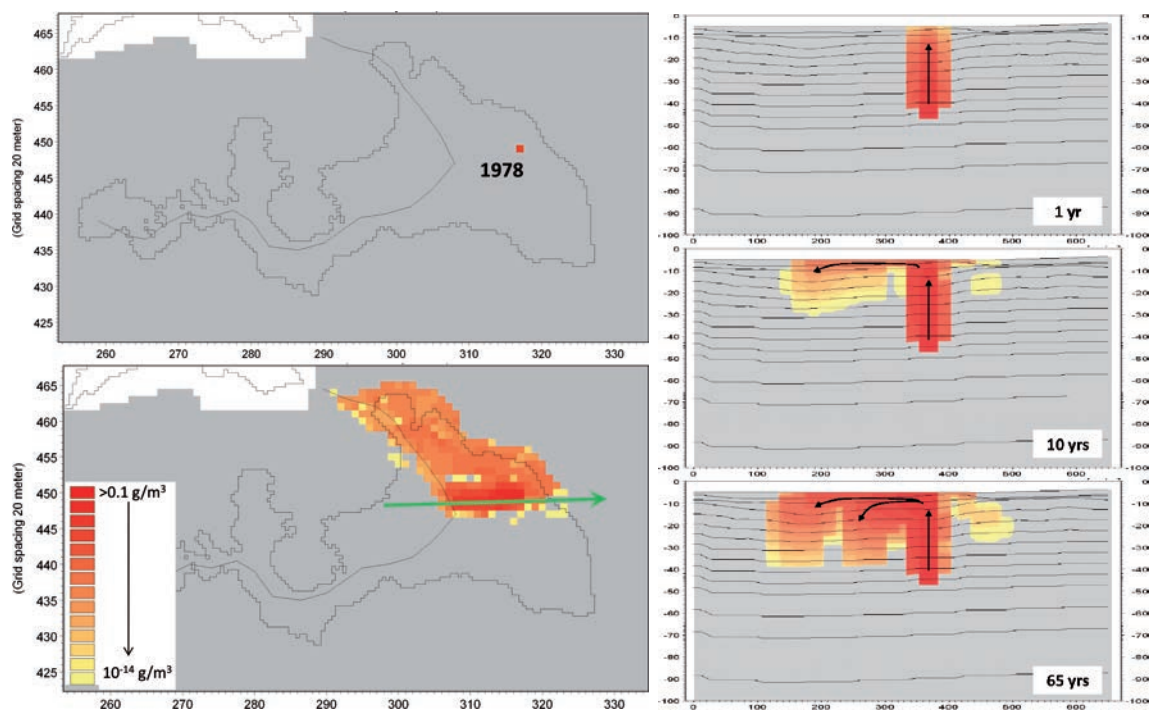
Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

Under den gångna programperioden har utvecklingen av modeller för flöde och transport i ytsystemet främst skett inom säkerhetsanalysen SR-Site och genom modelleringsaktiviteter avsedda att stödja denna. Här bör särskilt framhållas de modelleringar med beräkningsverktyget Mike She som genomfördes i syfte att undersöka utflödet av grundvatten från berget och transportförhållandena inom potentiella biosfärsobjekt i Forsmark. Modelleringarna gjordes med jämförelsevis hög upplösning (cellstorlek 20 meter i horisontalplanet) och utgjordes främst av partikelspårning och modellering av transport med advektion och dispersion av lösta ämnen, utan beaktande av retentionsprocesser. Fokus för modelleringen var framtida förhållanden, 10 000 år efter Kristus, inom delområden med objekt som ingick i biosfärsmodelleringens landskaps- och radionuklidtransportmodeller. Modeller och modellresultat beskrivs i rapporteringen av SKB:s yhydrologiska modellering i SR-Site (Bosson et al. 2010) och har även redovisats i tidskriftsartiklar (Berglund et al. 2011, 2013a, b).

I säkerhetsanalysen används partikelspårning i geosfärsmodelleringens hydrogeologiska modeller för att beräkna var grundvatten som passerat förvarsvolymen, och som därmed i framtiden skulle kunna innehålla radionuklider, når ytsystemet där exponering för strålning kan ske. Dessa utströmningspunkter utgör grund för identifieringen och avgränsningen av de biosfärsobjekt som används vid modelleringen av radionuklidtransport och dess konsekvenser. Osäkerheterna i utströmningspunkternas lägen har undersökts genom parallell modellering med Mike She, som medger en mer detaljerad representation av hydrologiska processer nära och på markytan. Resultaten visar på vissa skillnader mellan modellerna, men också att dessa skillnader inte har någon större betydelse för beskrivningen i termer av biosfärsobjekt (Lindborg 2010, Berglund et al. 2013b).

Spridningen av i grundvattnet lösta ämnen när de når ytsystemet har studerats genom advektionsdispersionsmodellering med Mike She. I denna modellering placerades källor på ett djup av cirka 40 meter under markytan längs strömningsvägar mellan förvaret och ytan, varefter transporten i bergets övre del och i jordlagren studerades. Resultaten visar att transporten ofta sker vertikalt upp till det översta marklagret, där horisontell spridning sedan kan ske (Bosson et al. 2010), se figur 27-5. Undantag med exempelvis mer omfattande spridning i bergets översta del förekommer dock, och det är svårt att utgående från dessa resultat identifiera typiska spridningsmönster eller plymstorlekar. Analysen illustrerar också att avgränsningar av plymstorlekar och påverkade områden är starkt beroende av vilken koncentration som antas som gräns mot omgivande ”rent” vatten (Lindborg 2010).

Ett nytt, eller åtminstone avsevärt förbättrat, inslag i säkerhetsanalysen är kopplingen mellan yhydrologisk modellering och den modell som används för att modellera radionuklidtransport och doser, se avsnitt 27.9 Radionuklidmodellering. I SR-Site gjordes detaljerade hydrologiska beräkningar för dagens förhållanden för ett antal utvalda områden med sjöar omgivna av våtmarker (Bosson et al. 2010). Vattenbalanser och flöden mellan olika enheter, till exempel geologiska skikt, som motsvarar ”boxar” i radionuklidtransportmodellen, beräknades för ett medelobjekt och transformerades till flödesparametrar i transportmodellen. I denna beräkning gjordes flödena i medelobjektet om till parametrar som kunde skalas med storlekarna på biosfärsobjekt och deras tillrinningsområden, detta gjordes för att man skulle kunna modellera alla biosfärsobjekt med deras respektive geometriska data (se Löfgren 2010 för detaljer). Beräkningar av flödeskomponenter för användning i radionuklidmodellen gjordes för både tempererade och periglaciala system, där data i det senare fallet erhöles från en talik i Mike She-modellen för periglaciala förhållanden i Forsmark, se avsnitt 26.4 Akvatiska ekosystem.



Figur 27-5. Vänster sida visar igenvuxen sjö från ovan (linjen anger ursprunglig strandlinje), med beräknade koncentrationer vid ytan. Mörkare färg indikerar högre koncentrationer. På vänster sida visar den övre figuren utsläppspunkten (källan) på 40 meters djup, den nedre figuren visar koncentrationen vid ytan efter 65 år. Höger sida visar koncentrationer efter 1, 10 och 65 år längs den profil som markerats med grön pil i den vänstra kartan (Bosson et al. 2010).

Under de senaste åren har utveckling av konceptuella och numeriska modeller för reaktiv transport i olika typer av jordmaterial bedrivits i en serie projekt. Projekten har i huvudsak genomförts inom ramen för platsundersökningar och säkerhetsanalyser, de modelleringar som utfördes i samband med SR-Site redovisas av (Piqué et al. 2010). Målsättningen har varit att utgående från platsdata från Forsmark identifiera och beskriva retentionsprocesser, exempelvis olika former av sorptions- och utfällningsprocesser, som skulle kunna påverka radionuklidtransporten i jordlagren på platsen. De identifierade processerna har därefter så långt som möjligt kvantifierats genom numerisk modellering av reaktiv transport, varvid advektion och dispersion kombinerats med så kallad processbaserad eller mekanistisk modellering av retentionen. Avsikten har varit att stödja den beskrivning i termer av huvudsakligen empiriskt grundade fördelningskoefficienter (K_d -värden) som används i säkerhetsanalysen. Resultaten av detta utvecklingsarbete har även redovisats i vetenskapliga publikationer (Grandia et al. 2011, Piqué et al. 2013a).

Jämförelser mellan uppmätta K_d -värden och beräknade värden från den reaktiva transportmodelleringen visar på kvalitativ överensstämmelse, vilket betyder att samma ämnen fördröjs mycket respektive lite. De kvantitativa skillnaderna är i vissa fall stora, och uppmätta K_d -värden är vanligen större än de beräknade. Detta tyder på att det återstår en del arbete med processidentifiering och kvantifiering av parametervärden innan kvantitativ överensstämmelse kan uppnås. Modelleringen har stegvis utökats i termer av komplexitet och antalet ingående ämnen. I den senaste etappen har sönderfallskedjor introducerats i den numeriska transportmodellen och effekterna av osäkerheter i parametervärden undersökts med probabilistisk känslighetsanalys (Piqué et al. 2013b). I avrapporteringen av denna modellering konstateras bland annat att fastläggning och sönderfall av torium under vissa förhållanden kan ha betydelse för generering och transport av radium.

SKB har under ett antal år finansierat forskning inom ramen för Krycklanprojektet, vilket är ett forskningsprogram som utifrån omfattande fältmätningar inom ett område vid Vindeln i Västerbotten undersöker en mängd frågeställningar inom hydrologi, hydrogeokemi och transport av ämnen. Forskningen grundar sig på ett stort dataunderlag som inkluderar hydrologiska data, bland annat ytvattenflöden från avrinningsområden med olika storlekar och variationer i andra egenskaper, och

koncentrationsdata från långvariga mätningar av grundämnen och radioaktiva ämnen av intresse för SKB. Mätningarna görs i ett område med sjöar, våtmarker, vattendrag och skogsområden liknande de som finns i Forsmark. SKB:s stöd har främst bestått i ett doktorandprojekt och ett postdoktorandprojekt. Doktorandprojektet, som enligt planerna avslutas under 2013, har resulterat i ett flertal publikationer som beskriver ämnestransport på olika skalor i det studerade landskapet (Lidman et al. 2011, 2012, 2013).

Lidmans forskning har bland annat undersökt skillnaderna i exporten av ämnen som uran, torium och selen från avrinningsområden med olika stora andelar våtmarker (myrar) och skog (Lidman et al. 2011, 2012). Resultaten visar på våtmarkernas stora inverkan på transporten av ämnen på landskapsnivå. De studerade ämnena ackumuleras i betydligt större utsträckning i avrinningsområden som domineras av våtmarker, jämfört med avrinningsområden som domineras av skog. Skillnaderna mellan olika avrinningsområden befanns vara systematiska och förutsägbara. I en detaljerad studie av en utvald myrmark kunde också betydande skillnader i aktivitetskoncentrationer av radioaktiva isotoper mellan olika delar av myren konstateras. Jämförelsevis höga koncentrationer noterades i områden där inflöde av grundvatten kan tänkas ske, medan koncentrationerna var betydligt lägre närmare utloppet från myren. Det konstaterades att endast en mindre del av myrens kapacitet för ackumulation av radionuklider sannolikt hade utnyttjats och att den således skulle fortsätta att fungera som en sänka långt in i framtiden.

Program

Detaljerna i det fortsatta programmet för hydrologi och transport återfinns i kapitel 26 Geosfären. Tillämpningen av dessa kunskaper beskrivs i avsnitten 27.3 och 27.4 för respektive ekosystem, samt vid studierna av biogeokemi (avsnitt 27.5), landskapsutveckling (avsnitt 27.8) och radionuklidmodellering (avsnitt 27.9). Av stor betydelse för ytnära ekosystem är studier av övergången mellan geosfär och biosfär. Det innefattar undersökningar och modelleringar av utströmning under hav och sjö, samt processbaserade studier av K_d . Dessutom kommer pågående forskningsprogram i Krycklanområdet att fortsätta med återkoppling till motsvarande fenomen i Forsmarksområdet, och jämförande studier på Grönland under permafrostförhållanden.

27.7 Effekter av långtidsvariationer

SKB:s förståelse av hur ämnen transporteras och ackumuleras i ytnära ekosystem bygger framför allt på beskrivningar av företeelser och processer som i dag kan observeras i Forsmark och Laxemar-Simpevarp. Många processer är klimatberoende och varierar i intensitet i takt med att klimatet växlar. Andra processer är sekundärt relaterade till klimat och förändringar i klimatet. Landhöjningen som starkt påverkar landskapsutvecklingen i kustnära områden som Forsmark, är till exempel en återgång mot ett nytt jämviktsläge efter att inlandsisar pressat ner berggrunden. Salthaltförändringar i Östersjön är ett annat exempel där strandlinjeförskjutning interagerar med avrinning, vilka båda påverkas av klimatet. För att bedöma den långsiktiga säkerheten av ett förvar är det därför nödvändigt att beakta långtidsvariationer som orsakas av klimatförändringar. SKB:s klimatprogram beskrivs i kapitel 19 Klimatutveckling. I programmet för ytnära ekosystem beskrivs de långsiktiga effekter som har stor betydelse för förståelsen av de ytnära ekosystemen.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 beskrevs planer på en sammanställning av ytsystemens funktion under tillstånd av permafrost. SSM såg positivt på arbetet som pågår inom Greenland Analogue Project, GAP, och ansåg det viktigt att resultaten på ett lämpligt sätt tolkas med hänsyn till förhållandena för befintliga och planerade slutförvarsanläggningar i Forsmark. Man såg det också som angeläget att SKB fullföljer planerna att conceptualisera flödesmodeller under perioder med inlandsis och permafrost utgående från resultat från GAP. Vidare påpekade SSM att SKB bör samla platsdata inte bara från dagens valda plats, utan även från platser där data kan representera egenskaper hos flera tiotusen år gamla ekosystem. Kärnavfallsrådet påpekade i sin granskning att de saknade ett program för att närmare beskriva biosfärens utveckling under klimat som är varmare än i dag.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Inom ramen för SR-Site har klimatförhållanden, till exempel temperatur, nederbörd, ytvattenbalans och vegetationsperiodens längd, under de olika klimatdomänerna beskrivits (Kjellström et al. 2009) (se kapitel 19 Klimatutveckling). Med utgångspunkt från denna beskrivning och aktuell vetenskaplig litteratur har SKB bedömt hur ekosystemen påverkas av variationer i klimat, samt vilka effekter detta kan få för faktorer som påverkar den långsiktiga radiologiska säkerheten för människor och andra organismer (Andersson 2010, Aquilonius 2010, Löfgren 2010). Ythydrologi och vattentransport har modellerats för både betydligt kallare och varmare klimat än i dag (Bosson et al. 2010). Även effekten av ett kallare klimat på igenväxning av sjöar och bildningen av talikar (områden av ofrusen mark under till exempel sjöar) har modellerats (Brydsten och Strömberg 2010, Hartikainen et al. 2010). Resultaten har bland annat använts som underlag i SR-Site för att beskriva ytnära ekosystem under tänkbara framtida klimattillstånd (Lindborg 2010).

I samband med säkerhetsanalysen SR-Site har också en ny modell för strandlinjeförskjutning under hela referensutvecklingen tagits fram (Lindborg 2010). Den nya modellen utgörs av en kombination av den tidigare modellen, som beskrev strandlinjeförskjutningen från den senaste isavsmältningen fram till i dag (Söderbäck 2008), och en modell för den framtida strandlinjeförskjutningen (Whitehouse 2009).

Greenland Analogue Surface Project, Grasp, startades 2011 efter ett fältbesök och en litteraturgenomgång av förutsättningar för en klimatstudie som analogi till ett kallare klimat (Engels och Helmens 2010, Nielsen 2010, Clarhäll 2011). Grasp inleddes med datainsamling, beskrivningar och modelleringar över ett avrinningsområde på Grönland. Projektet fokuserar på ämnestransport och massbalanser på ekosystem- och avrinningsområdesnivå, se figur 27-6. Resultaten kommer även att användas för att beskriva hur kopplingen mellan ytnära ekosystem och hydrologin i berget påverkas av periglaciala förhållanden. Förståelsen från dessa undersökningar kommer i nästa steg att användas för jämförande analyser med Forsmark.

Program

Under den kommande programperioden kommer SKB att beskriva periglaciala miljöer som existerar i dag genom fortsatt arbete i Grasp. Förståelsen från dessa undersökningar kommer i nästa steg att användas för jämförande analyser med Forsmark. Resultat från Grasp kommer även att användas för att beskriva hur kopplingen mellan ytnära ekosystem och berget påverkas av periglaciala förhållanden.

En utveckling mot ett klimat som är väsentligt varmare än i dag kan komma att innebära förändringar både för miljö och för människor. Flera av de processer som är viktiga för transport och ackumulation av radionuklider i ytnära ekosystem kan påverkas av till exempel vattenomsättning och isläggningsstid. SKB kommer därför att även fortsättningsvis följa kunskapsutvecklingen inom området, samt att med modellstudier undersöka hur förändringar i till exempel temperatur, hydrologi och markanvändning som förknippas med ett varmare klimat kan påverka långsiktig radiologisk säkerhet för människor och andra organismer. Under programperioden planeras studier och modellering av utvalda avrinningsområden i en temperaturgradient, från tempererade till periglaciala förhållanden. Resultaten kommer att användas för att öka förståelsen av hur processer och företeelser som styr transport och ackumulation av radionuklider kan påverkas av förändrade klimatförhållanden.



Figur 27-6. Bild över ett permafrostlandskap vid SKB:s undersökningsområde i Kangerlussuaq, Grönland. För att förstå långtidsförändringar av Forsmarks landskap används i dag existerande miljöer som exempel för Forsmark i framtiden. Här studeras ett område med ständigt frusen mark och övriga förhållanden som kan tänkas råda i samband med kallare perioder.

27.8 Landskapsutveckling och avlagringar

Som ett underlag för säkerhetsanalyser har SKB arbetat med en historisk beskrivning av de företeelser och processer som styr landskapets utveckling i Forsmark och Laxemar-Simpevarp (Söderbäck 2008). Den historiska beskrivningen har kopplats ihop med aktuell förståelse av hur landskapet ser ut och fungerar i dag (SKB 2008c, 2009c), och tillsammans utgör dessa grunden för att beskriva en sannolik utveckling av landskapet, under olika antaganden om framtida klimat och strandlinjeutveckling.

SKB har under platsundersökningarna, i de efterföljande platsmodelleringarna och i samband med säkerhetsanalysen SR-Site och SR-PSU, beskrivit landskapets geometrier, från berggrundens överyta, via djupare avlagringar av morän och lera, till jordmåner och ytliga sediment. Avlagringarnas fysikaliska och kemiska egenskaper har karakteriserats, och den resulterande platsmodellen är utgångspunkten för att beskriva ett landskap i förändring (Lindborg et al. 2006, 2013, Lindborg 2008, 2010).

De dominerande företeelserna som styr landskapsutvecklingen i Forsmark är klimatvariation och strandlinjeförskjutning, se kapitel 19 Klimatutveckling. Naturliga klimatförändringar har under Holocen lett till en succession från istida havsförhållanden efter en deglaciation till ett tempererat klimat där landskapet domineras av terrestra ekosystem (Söderbäck 2008, Lindborg 2010). Ovanpå dessa storskaliga och långsamma förändringar påverkas landskapet av sediment som tillförs och omlagras, vilket bland annat innebär att sjöar grundas upp och växer igen (Brydsten och Strömngren 2010). När ekosystemen avlöser varandra förändras de kemiska egenskaperna hos mark och vatten, liksom artsammansättningen av växter och djur.

I landskapets topografiska lågpunkter, till exempel i anslutning till sjöar, vattendrag och våtmarker, återfinns hydrologiska utströmningsområden för djupt grundvatten, se avsnitt 27.6 Hydrologi och transport. Förutsättningarna för transport och ackumulation av radionuklider i dessa områden bestäms av geometrier och egenskaper i det lokala och regionala avrinningsområdet. Landskapets storskaliga utveckling definierar var och när djupt grundvatten kan strömma upp till ytan. Utströmningsområdenas naturliga succession och deras möjlighet att brukas av framtida mänskliga samhällen för produktion av föda och som livsrum, är en förutsättning för att beräkna radiologisk risk för människan och miljön, se avsnitt 27.6.

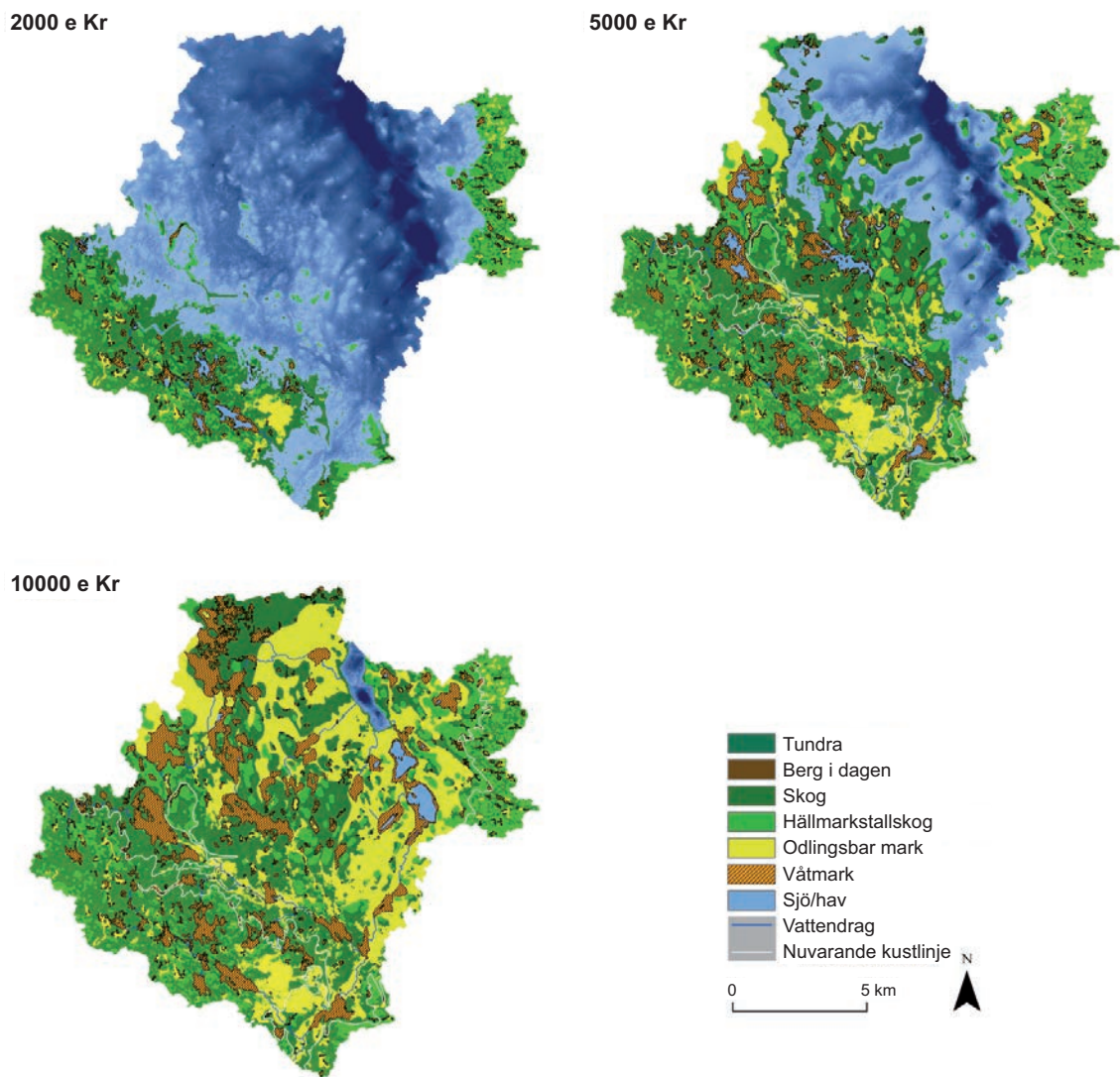
Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 var målsättningen att vidareutveckla metodiken som används för att beskriva landskapsutveckling, så att fler processtyrda parametrar kunde inkluderas i landskapsutvecklingsmodellen. I sin granskning av Fud-program 2010 ansåg SSM att SKB bör utnyttja information från inte bara dagens valda plats utan även från platser där data kan representera egenskaper och öka processförståelsen för andra typer av potentiella framtida ekosystem.

Nyvvunnen kunskap sedan Fud 2010

Sedan Fud-program 2010 har SKB tagit fram en ny version av landskapsutvecklingen för Forsmark (Lindborg 2010), se figur 27-7. Som en del i säkerhetsanalysen SR-Site har förståelsen från den historiska landskapsutvecklingen och från modeller för framtida utveckling använts för att ta fram tänkbara framtidsbeskrivningar av Forsmarks ekosystem och landskap (Andersson 2010, Aquilonius 2010, Bosson et al. 2010, Löfgren 2010, Piqué et al. 2010, Tröjbom och Grolander 2010).

Dessa beskrivningar bygger på den nya modellen för strandlinjeutvecklingen (Brydsten och Strömngren 2010, Lindborg 2010) och omfattar hela den pågående interglacialen (med perioder av permafrost), samt varianter av klimat som kan uppstå vid global uppvärmning. Processförståelse från platsen har bland annat omsatts i numeriska modeller som beskriver hydrodynamiken i havet (Karlsson et al. 2010) (se avsnitt 27.4), den framtida uppbyggnaden och erosionen av sediment i havet och på land (Brydsten 2009) för en hel interglacial, samt hur strandnära havsekosystem påverkas av strandlinjeförskjutningen (Hansen 2012). Till detta har hydrologin för framtida landskap och klimat kopplats, se avsnitt 27.6. Resultatet är en rumslig beskrivning av hur landskapet utvecklas kontinuerligt från hav till land, där havsvikar grundas upp och snörs av till sjöar, och sjöar växer igen till våtmarker. På detta landskap har sedan olika varianter av markanvändning tillämpats, från ett orört landskap som brukas för jakt och fiske, till ett rent jordbrukslandskap där all lämplig mark dikas och brukas för odling (Saetre et al. 2013, Sohlenius et al. 2013).



Figur 27-7. En tänkbar framtida utveckling av landskapet i Forsmark.

Program

Under den kommande programperioden kommer SKB att arbeta för att fördjupa förståelsen för transport och ackumulation av radionuklider på landskapsnivå, samt vidareutveckla metodiken för att beskriva landskapet och dess utveckling. Forskning och utveckling kommer främst att ske i samarbete med de universitet och organisationer som tidigare varit delaktiga i arbetet. Tyngdpunkten i utvecklingsarbetet kommer att ligga på den allmänvetenskapliga konceptuella förståelsen och på att förbättra beskrivningen av processer och parametrar som har avgörande betydelse för säkerhetsanalyser.

Arbetet med syfte att öka förståelsen för hur företeelser och processer i landskapet förändras med olika klimat kommer fortsätta. Genom att utnyttja analoga platser med andra klimat än det som råder i Forsmark i dag kommer den konceptuella förståelsen av ämne-transport på landskapsnivå att stärkas. Som exempel kan nämnas pågående arbete inom ett avrinningsområde vid Kangerlussuaq på Grönland och ett i Krycklanområdet i Västerbotten.

Utvecklingen av den konceptuella förståelsen av hur radionuklider transporteras och ackumuleras i ett landskap under förändring kommer även att utgå från resultat från simuleringsstudier och från planerade empiriska studier av massbalanser på landskapsnivå i Forsmark, i Krycklanområdet och på Grönland. Enligt planen kommer kunskapen att sammanställas i en konceptuell modell av landskapet som ska omfatta flera tänkbara typer av markanvändning och framtida klimat. Studier av tänkbara framtida utströmningsområden för djupt grundvatten och djupgaser kommer att göras för att bättre kunna beskriva radionuklidtransport till och inom dessa områden i samarbete med geokemiprogrammet och hydrologiprogrammet.

Preliminära analyser visar att igenväxningshastigheten för sjöar, vilken spelar stor roll för dynamiken i landskapsutvecklingen, är behäftad med osäkerheter. Kunskapen från det planerade biosfärsprogrammet kommer därför att utgöra ett viktigt underlag för att förfinna modeller som beskriver ekosystemsuccessionen från havsvik till våtmark, och hur denna påverkas av klimatförändringar, se avsnitten 27.3 Terrestra ekosystem och 27.4 Akvatiska ekosystem.

Den beräknade stråldosen till framtida invånare baseras på antaganden och förenklingar om hur människor kommer att vistas i och bruka naturresurser i landskapet. Det primitiva samhälle som har analyserats har valts för att det ger högst individdoser. SKB kommer fortsatt att arbeta med att förankra beskrivningen av framtida människors vanor i kunskap om historiska och samtida självförsörjande kulturer och människans näringsbehov.

27.9 Radionuklidmodellering

Forskningsprogrammet för ytnära ekosystem syftar till att ge förutsättningar för en rimlig bedömning av radiologiska risker för människor och andra organismer i samband med slutförvaring av använt kärnbränsle och annat radioaktivt avfall. En central del av programmet är därför att använda vår förståelse av processer och företeelser för en förenklad beskrivning av platsens utveckling i framtiden, så att transport och ackumulation av radionuklider i miljön kan beskrivas med numeriska modeller. Koncentrationen av radionuklider i födoämnen och dricksvatten uppskattas i sin tur från radionuklidernas fördelning i miljön. För att beräkna exponeringen för en representativ individ kombineras koncentrationer av radionuklider i miljön och födan med kunskap om strålningseffekter på kroppen, så kallade doskonverteringsfaktorer, och antaganden om de framtida invånarnas vanor. Eftersom radiologisk risk bedöms för en tid som ligger tusen eller tiotusentals år i framtiden är det inte självklart att konsekvensberäkningarna som baseras på kunskap om dagens människor direkt kan översättas i termer av verklig hälsorisk för framtida invånare på platsen. Radionuklidkoncentrationerna i miljön (mark, sediment och vatten) kombineras också med doskonverteringsfaktorer och överföringsfaktorer för att beräkna exponering till andra organismer än människa.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I Fud-program 2010 var målsättningen att vidareutveckla metodiken för dosberäkningar samt att tillämpa den i säkerhetsanalyser. Inför säkerhetsanalysen för ett utbyggt SFR avsågs representationen av processer som styr omsättningen av kol, och bakomliggande antaganden att ses över i detalj. En långsiktig ambition var även att komplettera empiriska överföringsfaktorer mellan miljön och mänsklig föda med en mekanistisk beskrivning av växtupptag och bioackumulation.

I sin granskning av Fud-program 2010 var SSM positiva till att SKB tar hänsyn till utspädningseffekter i den kommande säkerhetsanalysen SR-Site. SSM ansåg att SKB bör integrera konsekvensanalysen för biosfären och geosfären, för att få en bättre hantering av vissa processer i transportmodelleringen, till exempel radioaktivt sönderfall. Vidare ansåg SSM att SKB bör utreda möjligheten att förbättra modelleringen av kol-14 i terrestra ekosystem med utgångspunkt från modelljämförelser som gjorts inom Bioprot, samt att SKB bör förbättra valideringen av den kol-14-modell som är avsedd att användas i säkerhetsanalysen för ett utbyggt SFR. I den inledande granskningen av SR-Site identifierade SSM viktiga frågeställningar inom konsekvensanalysen som delvis berör SKB:s biosfärsprogram. Bland annat bedömde SSM att det finns ett behov av kompletterande information när det gäller representationen av radionuklidernas fördelningar som homogen inom biosfärsobjekt, samt verifieringen av använda modeller och beräkningskoder.

Kärnavfallsrådet fann vid sin granskning av Fud-program 2010 att synpunkter som rådet fört fram i tidigare granskningar delvis hade beaktats. Rådet konstaterade att de modellsystem som SKB använder är komplexa, och att det därför är viktigt att modellberäkningarna utvärderas och valideras med fältdata från befintliga ytekosystem i Forsmark. Rådet ansåg att de frågeställningar som SKB tog upp i Fud-program 2010 är relevanta i sammanhanget. Rådet efterlyste emellertid en mer detaljerad beskrivning av SKB:s projekt, samt en redogörelse för hur man avser att utnyttja de modeller man utvecklar i det fortsatta arbetet.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

Utvecklingen inom området radionuklidmodellering i ytnära ekosystem har under den senaste treårsperioden dominerats av arbetet med de två säkerhetsanalyserna SR-Site och SR-PSU. Arbetet inom SR-Site slutredovisades med en omfattande sammanställning och tillämpning av platsdata och nyutvecklade modeller (se sammanfattningar i SKB 2010t, Kautsky et al. 2013a). I SR-PSU har modelleringsmetodikerna vidareutvecklats, med fokus på beskrivningen av transport och ackumulering av kol-14.

I SR-Site beräknades konsekvenser för människa och miljö av ett eventuellt kapselbrott under antagandet om ett konstant utsläpp. För bedömningen av framtida människors säkerhet gjordes också beräkningar för ett pulsläpp av radionuklider. För bägge typerna av utsläpp sammanfattades beräkningarna i så kallade doskonverteringsfaktorer för landskapet (LDF). Dessa har enheten årlig dos (Sievert) per utsläppshastighet (Bequerel per år) eller per puls (Bequerel). Den slutgiltiga dosen beräknades alltså genom att multiplicera utsläppet som når ytan med respektive doskonverteringsfaktor, och sedan summerna över alla grundvattenburna radionuklider som når ytan. Även för bedömningen av dos till andra organismer antogs ett konstant utsläpp, men i stället för att redovisa doskonverteringsfaktorer beräknades dosrater (Gray per timme) direkt (Torudd 2010). Totalt simulerades transport och ackumulering av 40 radionuklider i 18 potentiella utströmningsområden i Forsmarks framtida landskap för de olika klimatscenerierna, se figur 27-9. Simuleringarna gjordes med verktygen Pandora och Ecolego.

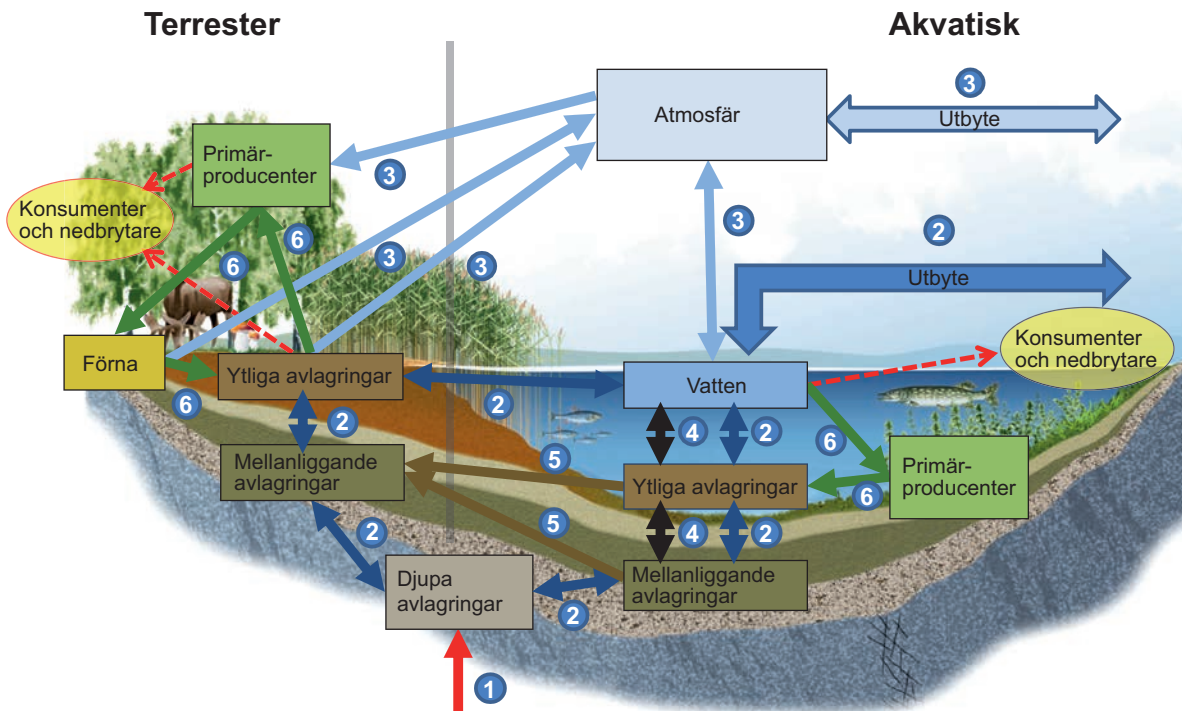
De viktigaste uppdateringarna av modelleringsmetodikerna som gjordes i SR-Site omfattade beräkningarna av aktivitetskoncentrationen i miljön (Avila et al. 2010, 2013). Modellen som användes beskriver hur hela det antagna utsläppet av radionuklider når ett och samma utströmningsområde. Först efter att ha passerat de djupare moränlagren omsätts radionuklider i ytliga marklager, ytvatten och atmosfären, se figur 27-8. I modellen beskrivs successionen av ekosystem kontinuerligt över tiden, som en funktion av landhöjning, sedimentation och igenväxning. Övergången mellan hav och sjö beskrivs med en isoleringstid på omkring 500 år, och därefter minskar sjöns storlek gradvis. Akvatiska och terrestra ekosystem förekommer samtidigt i ett och samma utströmningsområde, men storleksförhållandena ändras över tiden (Lindborg 2010). I beräkningarna antogs det att hela utsläppet når det framtida utströmningsområde där konsekvenserna blir störst.

Även metodiken för att beräkna exponering för framtida människor som vistas i ett visst landskapsobjekt vidareutvecklades i SR-Site. För tiden då ett utströmningsområde ligger under eller strax över havsytanivån antogs människor i landskapsobjektet livnära sig som jägare/fiskare/samlare. När området ligger tillräckligt högt över havsytan, antogs att större delen av våtmarken dikas och används som jordbruksmark, alternativt för bete. De mest exponerade individerna antogs vistas i och i första hand hämta hela sin föda från det kontaminerade området så långt det är möjligt. De individer som i beräkningarna fick högst exponering, över alla tidpunkter och utströmningsområden, utgjorde den mest exponerade gruppen i SR-Site (Avila et al. 2010).

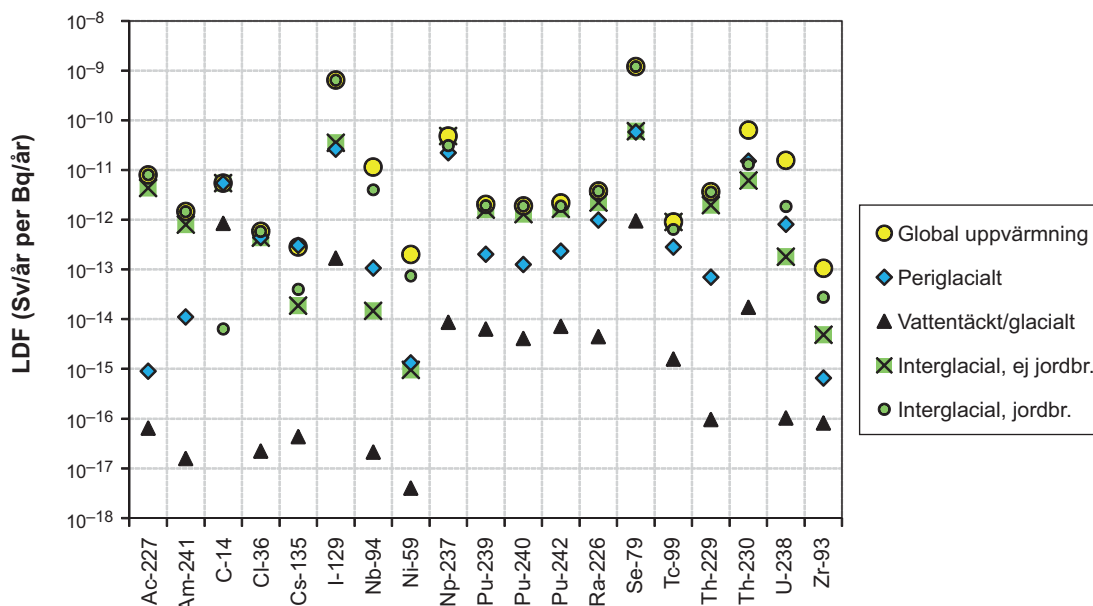
För att bedöma om ett potentiellt utsläpp av radioaktivitet kan utgöra en risk för miljön beräknades i SR-Site dosrater till ett brett spektrum av organismer med Erica-verktyget (Beresford et al. 2007, Brown et al. 2008). De beräknade dosraterna var flera storleksordningar under den nivå där det finns risk för att strålning kan påverka reproduktion och/eller överlevnad. Analyser med generiska och platsspecifika data för biologiskt upptag och/eller morfologi gav likartade resultat, och effekten av parameterosäkerhet påverkade inte slutsatserna. Av dessa resultat drar SKB slutsatsen att det inte finns anledning att anta att någon av arterna på platsen (Forsmark) skulle ta skada av den ökade strålexponeringen vid ett eventuellt utsläpp (Torudd 2010, Torudd och Saetre 2013).

I den pågående säkerhetsanalysen SR-PSU har SKB utvecklat modelleringsmetodikerna ytterligare. Modellutvecklingen har i första hand fokuserats på att förbättra beskrivningen av transport och ackumulering av kol-14 i tidigare säkerhetsanalyser för SFR dominerat dosen (huvudrapporter för SAR-08 och SAFE).

Växtupptag av koldioxid från atmosfären är en potentiell exponeringsväg för kol-14. SKB har följt de senaste årens jämförelse och utvärdering av jordbruksmodeller för kol-14 inom organisationen Bioprota (Limer et al. 2012). Som en naturlig förlängning av detta arbete har Tagesson (2012) sammanställt mikrometeorologisk litteratur som behandlar turbulent transport i luftlager i närheten av eller strax ovanför växtlighet, se avsnitt 27.3 Terrestra ekosystem. I radionuklidmodellen för SR-PSU kommer SKB att tillämpa dessa kunskaper.



Figur 27-8. Konceptuell bild av radionuklidmodellen i SR-Site. Rektanglar visar förråd av radionuklider, breda pilar radionuklidflöden kopplade till materialflöden, och streckade pilar upptag av organismer som beräknats med koncentrationsfaktorer. Modellen består av en akvatisk del (till höger) och en terrester del (till vänster), vilka vilar på en gemensam bas av djupa avlagringar och delar en gemensam atmosfär. De terrestra och akvatiska avlagringarna består av en övre del och ett mellanliggande lager. I båda miljöerna finns det växter (primärproducenter). I den terrestra miljön finns dessutom ett förråd som representerar förna. Röd pil (1) visar utsläppet från geosfären. Typen av materialflöden som bär radionuklider indikeras med färg: Transporten av radionuklider i mörkblått indikerar vattenflöden, ljusblått gasflöden, svart sedimentation/resuspension, brunt torvtillväxt och grönt biologiskt upptag/utsöndring. Utbyte med omgivning (2 och 3) illustreras med dubbelspetsade pilar. En mer detaljerad beskrivning återfinns i rapporterna Andersson (2010) och Avila et al. (2010).



Figur 27-9. Maximala landskapsdoskonverteringsfaktorer (LDF) för 19 radionuklider beräknade för olika klimat- och markanvändningsfall. LDF-värden för den inledande havsperioden användes för att representera ett vattentäckt landskap i närheten av isfronten (vattentäckt/glacialt). Figur modifierad från SKB (2010t).

De största kolförråden i landskapet utgörs av organiska sediment och torv som inlagrats under syrefria förhållanden i sjöbottnar och våtmarker. Kol som inlagrats i dessa förråd kommer att frigöras i samband med att marken dikas och uppodlas. Radionuklidmodellen kommer att uppdateras så att den bättre beskriver processer för inlagring och oxidering av radionuklider i organiskt material. Antaganden om framtida invånarens markanvändning och vanor har vidareutvecklats med utgångspunkt från historiska, självförsörjande kulturer. Därigenom kan hänsyn tas till landskapets begränsningar och människans näringsbehov i säkerhetsanalysernas stiliserade beräkningsfall (Saetre et al. 2013).

I SR-PSU kommer exponeringsberäkningarna för andra organismer än människa att fortsatt vara baserade på metoderna i Erica-verktyget, men beräkningarna kommer att integreras med modelleringen av transport och ackumulation i ytekosystemen. Detta möjliggör tidsberoende beräkningar av exponering, och en direkt hantering av osäkerheter i beräknade miljökoncentrationer. Stor vikt har även lagts vid att uppskatta realistiska överföringsfaktorer för de ingående organismerna, med tyngdpunkt på att använda platspecifik information, se avsnitt 27.5 Biogeokemi.

Program

SKB kommer att fortsätta utvecklingen av metodiken för dosberäkningar med utgångspunkt från nyvunnen kunskap från biosfärsprogrammet och tillämpningarna av metodiken på säkerhetsanalyser. Granskningen av SR-Site pågår och under den kommande treårsperioden kommer också granskningen av ansökan om utbyggnaden av SFR att komma i gång. Dessutom pågår förberedelser för att beräkna doskonsekvenser från SFL. Det betyder att kompletterande modellutveckling, tester av modeller och sammanställningar av konsekvenser kan vara nödvändiga för att svara på granskningsfrågor eller förtydliga tidigare arbete inom säkerhetsanalyserna.

Även om modellerna som representerar ytekosystemen är snarlika för de olika förvarerna, så varierar kraven på upplösning av processer och tidsperioder med typen av radionuklider i, och tidpunkten för, eventuella utsläpp från respektive förvar. Modellerna kan därför behöva anpassas till de specifika frågeställningarna.

Utvecklingsarbetet som gjorts inom SR-PSU och som omfattar bland annat kol-14-omsättningen, kommer att redovisas under den kommande treårsperioden. När det gäller SFL krävs insatser för att bättre beskriva omsättningen av klor och ackumulation av klor-36, molybden-93 och olika nickel-isotoper. Modellutvecklingen kommer i första hand att bygga på insamlade data, se avsnitt 27.5 Biogeokemi. Beskrivningen av atmosfärsutbyte kommer att utvidgas från koldioxid, till att även omfatta andra föreningar som kan förekomma i gasfas, till exempel radon, jod, selen och klor. Dessa modeller kan också användas för att studera utsläpp under driften av anläggningarna.

Ett långsiktigt arbete med att få en mer realistisk representation av upptaget av radionuklider i akvatiska och terrestra näringsvävar pågår. Målsättningen är att identifiera de dominerande flödena av organiskt material, näringsämnen och vatten inom respektive ekosystem och de faktorer som reglerar dessa flöden, se avsnitt 27.3 Terrestra ekosystem och 27.4 Akvatiska ekosystem, för att uppdatera representation av biologiskt upptag i radionuklidmodelleringen. Det kan ersätta eller komplettera koncentrationsfaktorerna för organismer med mekanistiska modeller. Arbetet inom respektive ekosystem identifierar de dominerande flödena och upptagsfaktorerna, parallellt med att radionuklidmodellerna modifieras. Fördelen med en mer processororienterad beskrivning av biologiskt upptag är att flera processer är gemensamma för många organismer och att de är radionuklidberoende. Dessutom finns möjligheten att explicit ta hänsyn till hur ackumulation i näringsväven påverkas av till exempel klimat och andra förändringar i miljön, vilket kan ge mindre osäkerheter.

En översyn av hanteringen av urans sönderfallskedja, inklusive radontransport, i modelleringen av ytekosystemen kommer att påbörjas. Översynen planeras omfatta transport och exponering av radon, och syftar bland annat till att belysa konsekvenserna av olika transporthastigheter för den beräknade dosen. Dessutom förväntas genomgången av platsdata, se avsnitt 27.5 Biogeokemi, generera nya insikter som kan användas för att kontrastera uppmätta koncentrationer med beräkningar, alternativt validera begränsade delar av radionuklidmodellerna.

SKB planerar att se över hur den tids- och rumsmässiga avgränsningen av de mest kontaminerade områdena påverkar exponering av andra organismer än människor. SKB kommer därför att medverka i ett Bioprotect-projekt kallat Space (Scales for Postclosure Assessment Scenarios), se vidare avsnitt 27.11 Nationella samarbeten, internationellt arbete samt informationsspridning.

Pandoraverktyget som användes för dosberäkningar i SR-Site har utvecklats i samarbete med Posiva (Åstrand et al. 2005). Verktygets funktionalitet kommer att utvärderas i förhållanden till SKB:s långsiktiga behov. Det kommer också att jämföras med alternativa verktyg, till exempel Ecolego och Comsol. I dag sker dosberäkningarna för andra organismer än människan med verktyget Erica. SKB kommer att utvärdera möjligheterna att integrera dosberäkningarna för alla organismer (inklusive människan) i ett gemensamt verktyg.

27.10 Miljöövervakning

Ett slutförvar kan påverka omgivningen på olika sätt, både under bygge och drift och efter förslutning. Den potentiella påverkan kan vara både radiologisk och icke-radiologisk. Den eventuella radiologiska påverkan utvärderas i säkerhetsanalyserna, medan den icke-radiologiska påverkan antas kunna ske under bygge och drift och tas om hand i MKB-processen.

Inför starten av platsundersökningarna gjordes en noggrann genomgång av vilka variabler i ytsystemet som behöver beskrivas vid en platsundersökning för ett slutförvar (Lindborg och Kautsky 2000). I genomgången identifierades även vilka parametrar som behöver beskrivas med avseende på variation i tiden. Detta låg till grund för det omfattande program för insamling av både abiotiska och biotiska parametrar som genomfördes under platsundersökningarna och som har redovisats i samband med platsbeskrivningarna (Lindborg 2008, Söderbäck och Lindborg 2009). Ett reducerat provtagningsprogram har fortsatt även efter avslutningen av platsundersökningarna 2007.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

I granskningen av Fud-programmen 2007 och 2010 tog Kärnavfallsrådet på flera ställen upp frågor som rör miljöövervakning. Bland annat pekades på vikten av att studera biosfärsparametrarnas variation i tiden. Vidare påpekades att det är angeläget att det fortsatta forsknings- och utvecklingsarbetet belyser förutsättningarna för val av mätbara parametrar som kan ge en bild av förhållandena i och kring slutförvaret.

Program

SKB planerar att fortsätta med det övervakningsprogram som i dag gäller för Forsmark. Om ny kunskap från biosfärsprogrammet visar att ytterligare variabler eller mätpunkter behövs för att stödja biosfärsmodelleringen eller för att särskilja naturlig variation från effekter av ett framtida förvar, så kommer programmet att utökas i enlighet med det. För att kunna skilja naturliga variationer från effekter av påverkan kommer det dessutom att behövas tidsserier från referensområden för ett antal centrala parametrar. I det detaljerade undersökningsprogram som ska utformas inför byggstarten av förvaret ska därför även behovet av referensdata tillgodoseas. SKB bedömer att det inte finns något behov av riktade forskningsinsatser på detta område, men en utvärdering av de genomförda undersökningarna och insamlade data behöver göras.

27.11 Nationella samarbeten, internationellt arbete samt informationsspridning

SKB deltar aktivt i ett antal internationella samarbetsfora som rör radiologisk säkerhet för människa och miljö, bland annat inom ramen för IAEA-program och EU-projekt, samt inom sammanslutningar som Bioprotä och International Union of Radioecology (IUR). SKB stödjer dessutom forskning vid flera universitet och högskolor. SKB anser att det är angeläget att sprida nyvunnen kunskap, samt att göra data och resultat tillgängliga för nationell och internationell granskning, bland annat genom vetenskaplig publicering och aktivt deltagande i symposier och seminarier.

Aktiviteter

SKB har deltagit IAEA:s program för modellering av radiologisk risk i miljön (Emras), och 2010–2011 stod SKB för ordförandeskapet för en arbetsgrupp (WG3) i Emras2. Arbetsgruppens mål har varit att stödja uppdateringen av IAEA:s rekommendationer när det gäller biosfärsmodellering kopplat till klimat och miljöförändringar, för att bedöma säkerheten vid slutförvaring av radioaktivt avfall. Engagemanget i Emras har från och med 2012 fortsatt i Modaria (Modelling and Data for Radiological Impact Assessments), där SKB står för ordförandeskapet i arbetsgrupp WG6. SKB deltar också i arbetsgrupperna WG8 och WG9 som hanterar andra organismer än människan. Dessutom har SKB deltagit i marin modellering i arbetsgruppen WG10.

SKB deltar också i IAEA:s projekt om intrång i förvaret, Hidra (Human Intrusion in the context of Disposal of RAdioactive waste) som startade 2012 och planeras att avslutas 2015. SKB står för ordförandeskapet i arbetsgrupp WG2, som hanterar sociala aspekter i framtagandet av scenarier för mänskligt intrång.

SKB har fungerat som referensgrupp för Eu-projektet Star (Strategy for Allied Radioecology, <http://wiki.ceh.ac.uk/display/star>) och där uttryckt behovet av att säkra tillgången till radioekologisk kompetens i framtiden.

SKB har varit aktivt inom Bioprota, ett internationellt samarbetsprojekt runt nyckelfrågor för bedömning av långsiktig radiologisk säkerhet i biosfären. Deltagare i gruppen omfattar såväl organisationer som gör bedömningar av radiologisk risk, till exempel SKB, Posiva, EDF och Nagra, som granskande myndigheter, till exempel SSM och NDA (Nuclear Decommissioning Authority). SKB har aktivt deltagit i bland annat arbetsgrupperna för kol-14, integrering av geosfär och biosfär, och exponering av andra organismer än människan. SKB har även deltagit i gruppen för radioaktivt avfall inom IUR.

Samarbetet med Posiva har fortsatt, framför allt inom Bioprota. Även inom Grönlandsprojektet, se avsnitt 27.7 Effekter av långtidsvariationer och kapitel 19 Klimatutveckling, har SKB samarbetat med Posiva, och med ett antal andra organisationer, NMWO (Kanada), NDA (Storbritannien) samt GEUS (Danmark). När det gäller ytnära ekosystem har arbetet varit knutet till fältprovtagningar under permafrostförhållanden och SKB har anordnat ett antal workshoppar med anknytning till detta.

En redovisning av SKB:s arbete kring ytnära ekosystem och klimat har publicerats i ett specialnummer i den vetenskapliga tidskriften *Ambio* (Kautsky et al. 2013b). Olika vetenskapligt intressanta frågeställningar behandlas där i 14 artiklar, med syfte att exemplifiera arbetet med att illustrera ekosystem och människan i framtiden. Första artikeln är en sammanfattning och överblick av specialnumret (Kautsky et al. 2013a). Vidare beskrivs arbetet med klimat i (Näslund et al. 2013) och landskapsutvecklingen (Lindborg et al. 2013). Vattenomsättningen beskrivs ur olika aspekter (Berglund et al. 2013a, b) inklusive havet (Corell och Döös 2013, Eriksson och Engqvist 2013) samt hanteringen av grundvattenavsänkning (Werner et al. 2013). Avlagringarnas retentionsegenskaper visas från fältmätningarna (Sohlenius et al. 2013), samt med modeller (Piqué et al. 2013a). Det modellerade upptaget i marina organismer jämförs mellan olika modeller, samt med platsdata (Erichsen et al. 2013). Dosberäkningar för människa (Avila et al. 2013), liksom för andra organismer (Torudd och Saetre 2013), beskrivs. En genomgång av hur människan historiskt har brukat mark eller utnyttjat naturresurser som mat har gjorts, tillsammans med en sammanställning av rimliga sätt att er hålla mat i framtiden (Saetre et al. 2013).

SKB har dessutom presenterat data och vetenskapliga resultat vid ett antal internationella och nationella symposier. Bland annat gav SKB en introduktionsföreläsning om SKB:s marina forskning vid International Conference on Marine and Coastal Ecosystems (MarCoastEcos 2012). SKB har även bidragit med föredrag och posters vid ett antal olika symposier, International Conference on Radioecology and Environmental Radioactivity (ICRER-2011) i Kanada (Berglund et al. 2011, Ikonen et al. 2011, Lindborg et al. 2012, Werner et al. 2011), Svenska OIKOS 2013 och Svenska Havsforskarföreningen (SHF2011). Medarbetare inom SKB:s biosfärsgrupp är regelbundet anlitade som granskare av artiklar inför publicering i vetenskapliga tidskrifter. SKB:s kompetens inom biosfärsområdet har även rådfrågats från till exempel Svealands Kustvattenvårdsförbund.

SKB föreläser årligen om biosfärsprogrammet vid flera av landets universitet och stödjer forskningsprojekt vid Sveriges lantbruksuniversitet, Umeå universitet, Stockholms universitet och Linköpings universitet. SKB stödjer seminarieverksamheten vid Centret för strålskyddsforskning vid Stockholms universitet. SKB finansierar fem doktorander med anknytning till biosfärsprogrammet vid Stockholms universitet, Umeå universitet samt Sveriges lantbruksuniversitet i Umeå. Under 2012 lades en SKB-finansierad doktorsavhandling fram i oceanografi (Corell 2012) och en licentiatavhandling inom radioekologi (Konovalenko 2012).

Program

SKB kommer under den kommande programperioden att vara fortsatt aktiva inom Bioprota, och engagemanget inom IAEA-projektet Modarias olika arbetsgrupper. Även engagemanget i IAEA-projektet Hidra om intrång i förvaret kommer att fortsätta.

Resultat och nyvunnen kunskap kommer att spridas via vetenskaplig publicering och ett aktivt deltagande vid internationella symposier, samt via seminarier och föreläsningar vid landets universitet och högskolor. SKB kommer att fortsätta stödja forskargrupper vid inhemska och utländska universitet. SKB kommer även fortsättningsvis att bevaka den internationella utvecklingen och utvärderingen av existerande modeller för beräkning av aktivitetskoncentrationer av bland annat kol-14 och radium-226 inom Bioprota.

Samarbetet med Posiva kommer, förutom i Bioprota och Modaria, att fortsätta med en gemensam sammanställning av platsdata. SKB planerar även att delta i EU-projektet GHG-Aquaflex när det gäller metanomsättningen i sjöar.

28 Andra metoder

Det finns två tänkbara huvudvägar för hantering av det använda kärnbränslet. Den ena vägen innebär att man betraktar kärnbränslet som en resurs, den andra att man väljer att se det som avfall.

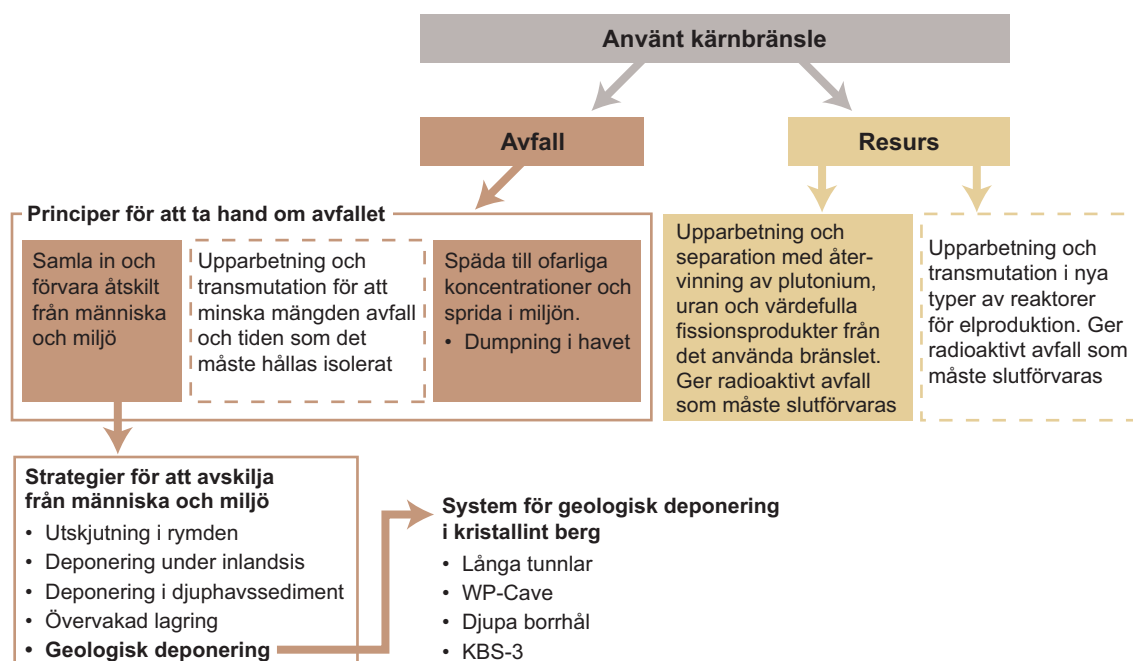
Vissa principer och strategier för hanteringen av det använda kärnbränslet har, både i Sverige och i andra länder med kärnkraftsreaktorer, avförts från vidare utveckling därför att de uppenbart förefaller olämpliga och/eller praktiskt ogenomförbara. Andra principer och strategier har setts som tillräckligt intressanta för att motivera fortsatta analyser. Sådana analyser har i sin tur efter hand resulterat i att vissa system har befunnits mindre lovande än andra. Fortsatt kunskapsuppbyggnad och utvecklingsarbete av mindre lovande system har lagts åt sidan.

Figur 28-1 illustrerar de principer och strategier för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle som beaktats vid flera tillfällen. De strategier som har aktualitet i dag är:

- Upparbetning, separation och transmutation.
- Geologisk deponering.

Vid upparbetning återtas klyvbart material och fissionsprodukterna separeras som avfall. Separation och transmutation kan ge möjligheter att minska mängden av vissa långlivade radionuklider i det använda kärnbränslet. Jämfört med använt kärnbränsle har sönderfallsprodukterna efter transmutation kortare halveringstider eller är i vissa fall till och med stabila. Efter separation och transmutation återstår dock radioaktivt avfall som måste slutförvaras under lång tid. Transmutation bör därför inte ses som en teknik för slutligt omhändertagande, utan i stället som en möjlig teknik för att i framtiden utnyttja bränslet mer effektivt i helt nya typer av reaktorer (von Lenza et al. 2007).

Att använda transmutation enbart för att minska mängden högaktivt långlivat avfall är inte rationellt, varken ekonomiskt eller resursmässigt. Transmutation kommer därför troligen komma ifråga endast om nya typer av reaktorer, så kallade snabba reaktorer, utvecklas som kan utnyttja uranråvaran och plutonium mera effektivt. Dessa skulle även kunna användas för transmutation, dock med en ökande kostnad (CEA 2012).



Figur 28-1. Principer, strategier och system för omhändertagande av använt kärnbränsle. Principerna i de streckade rutorna baseras på teknik som inte är tillgänglig i dag.

Transmutation är ett forskningsområde som enligt samstämmiga bedömningar kräver ytterligare flera decennier av utvecklingsarbete innan fullskaliga demonstrationsanläggningar kan byggas. Tekniken är således inte tillgänglig i dag, varför en ensidig satsning på separation och transmutation skulle skjuta över ansvaret för att omhänderta det använda kärnbränslet på kommande generationer (CEA 2012).

Det finns ett brett internationellt samförstånd kring principerna för förvaring av använt kärnbränsle och högaktivt avfall, och i flertalet länder med kärnkraft pågår en utveckling av dessa förvarssystem. Metoderna baseras på system med flera barriärer på stora djup i geologiska formationer. Det system som utöver KBS-3-metoden förs fram som intressant för svensk del av en del aktörer är deponering i djupa borrhål.

Separation och transmutation samt deponering i djupa borrhål beskrivs i avsnitt 28.1 respektive 28.2.

28.1 Separation och transmutation

Forskning och utveckling av metoder för separation och transmutation av långlivade radionuklider i använt kärnbränsle har under det senaste decenniet tilldragit sig ett växande intresse. Huvudsyftet med separation och transmutation är att ta bort eller åtminstone avsevärt minska mängden långlivade radionuklider som måste deponeras i ett slutförvar.

De viktigaste radionukliderna i detta hänseende är de så kallade transuranerna, det vill säga ämnen som är tyngre än uran. Dessa bildas i kärnreaktorer genom att en eller flera neutroner infångas av uranatomer, som sedan via radioaktiva sönderfall omvandlas till neptunium, plutonium, americium eller curium. Även små mängder av ännu tyngre ämnen än curium kan bildas, men dessa är av mindre betydelse i detta sammanhang. Några enstaka klyvningsprodukter (teknecium-99, jod-129) kan också vara av visst intresse för transmutation.

I dag finns det stora uppberedningsanläggningar som separerar uran och plutonium från varandra och från övriga ämnen i använt kärnbränsle. Dessa anläggningar kan emellertid inte avskilja de övriga transuranerna – neptunium, americium och curium – från det högaktiva avfall som måste slutförvaras. Plutonium utgör cirka 90 procent av den totala mängden transuraner i använt kärnbränsle från dagens lättvattenreaktorer.

Målet för den pågående forskningen om separation är att finna och utveckla processer som är lämpliga för separation av tyngre transuraner (och eventuellt även vissa klyvningsprodukter) i industriell skala medan målet för den pågående forskningen om transmutation är att definiera, undersöka och utveckla anläggningar som är lämpliga för transmutation av de nämnda långlivade radionukliderna i industriell skala.

Forskning inom separation och transmutation startade redan på 1950-talet när kärnkraftsutvecklingen tog fart. Under de därpå följande decennierna var den främst knuten till utvecklingen av brytdreaktorer. När intresset för denna utveckling minskade till en mycket låg nivå under det tidiga 1980-talet försvann också intresset för separation och transmutation mer eller mindre.

Intresset förnyades under 1990-talet, huvudsakligen inriktat mot acceleratordrivna system (ADS) för omvandling av långlivade ämnen i använt kärnbränsle. De senaste åren har intresset för snabbreaktorer för transmutation återkommit. Ett exempel på detta är att den gemensamma europeiska intresseorganisationen Sustainable Nuclear Energy Technology Platform har antagit en strategisk forskningsplan i vilken utveckling och byggnation av en natriumkyld snabbreaktor för transmutation har givits högsta prioritet. Design av en sådan reaktor är i full gång. Därmed är intresset för snabba reaktorer nu större än för acceleratordrivna system, och forskningen inom området har i stor utsträckning inriktats mot frågor av icke teknologispecifik karaktär, det vill säga områden där resultaten är användbara inom såväl kritiska som acceleratordrivna system.

En genomgång av läget av forskningen inom separation och transmutation gjordes på uppdrag av SKB under 1997–1998 och rapporterades i Enarsson et al. (1998). Liknande lägesrapporter har utarbetats inom referensgruppen för forskning och utveckling kring separation och transmutation 2004, 2007, 2010 och 2013 (Ahlström et al. 2007, Blomgren et al. 2010). De bedömningar som presenteras nedan baseras på 2013-års rapport.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SSM framhöll att separation och transmutation i nuläget inte är ett realistiskt alternativ till direkt-deponering av det använda kärnbränslet. Det är dock av stor betydelse att kompetensen inom området bibehålls och utvecklas. I likhet med vad som framfördes av SKI vid granskningen av Fud-program 2007 ville SSM anföra följande skäl för denna ståndpunkt:

- Enligt kärntekniklagen ska Fud-programmet vara allsidigt, vilket innebär att även strategier och metoder som i dagsläget kan anses som mindre realistiska behöver ingå. Detta gäller inte minst sådana metoder där avsevärda utvecklingsinsatser pågår i omvärlden.
- För att upprätthålla kompetens att göra egna bedömningar av utvecklingen på området måste Sverige aktivt delta i denna utveckling. Att passivt följa denna räcker inte när det gäller ett så komplext område som separation och transmutation.
- En ännu viktigare aspekt är att SKB:s program på området separation och transmutation bidrar till att bibehålla en tillräckligt hög nivå på forskning och utbildning inom områden av kärntekniken som är av avgörande betydelse också för en strålsäker hantering av kärnämne och kärnavfall inom det nu aktuella programmet.
- Ett aktivt deltagande i det internationella forskningssamarbetet på detta område ger på liknande sätt bättre möjligheter att tillgodogöra sig kunskap av betydelse även för det nuvarande kärnavfallsprogrammet, liksom för andra delar av kärntekniken.

SSM ansåg därför att SKB även i fortsättningen behöver satsa medel på arbete inom området separation och transmutation på den nivå som föreslås i SKB:s program, det vill säga mellan sex och sju miljoner kronor per år.

I likhet med SKB ansåg SSM att separationsstudierna liksom tidigare bör vara inriktade mot vätskeextraktion i vattenbaserade system, inte minst eftersom detta ger större bredd i kunskapsuppbyggnad av betydelse även för andra delar av kärnbränslecykeln, inklusive slutförvaring.

Ny vunnen kunskap sedan Fud 2010

Vetenskapsrådet beviljade år 2009 det i särklass största forskningsanslaget på 30 år till ny kärnteknik i Sverige, detta som en följd av en direkt instruktion från regeringen. Därmed fanns det för första gången efter folkomröstningen år 1980 avsevärda statliga medel till forskning inom separation och transmutation i landet. SKB var därmed inte längre ensam extern finansiär inom området; SKB var faktiskt inte heller längre störst.

En satsning på separation och transmutation skulle innebära att Sverige kunde driva nya snabbreaktorer i över 100 år, genom att upparbeta det bränsle som kommer från dagens kärnkraftsanläggningar. Detta skulle också minska mängden långlivade radionuklider. En lyckad utveckling av separation och transmutation inom ramen för avancerade bränslecykler kommer dock inte att eliminera behovet av slutförvar för högaktivt och långlivat avfall. De komplexa processerna kommer oundvikligen att generera avfallsflöden med långlivade radionuklider, även om mängderna blir mindre. Däremot kan utvecklingen minska kraven på de tekniska barriärerna. Det kan även minska behovet av förvarsvolym för högaktivt avfall. För låg- och medelaktivt avfall torde däremot volymerna öka på grund av separationsprocesserna.

För svensk del är det viktigt att delta i den internationella utvecklingen och upprätthålla en rimlig kompetensnivå inom landet, åtminstone så länge som en väsentlig del av landets elproduktion baseras på kärnenergi. Kompetens som utvecklas i samband med forskning på separation och transmutation är värdefull, inte enbart för att bedöma utveckling och potential inom detta område, utan också för utveckling av säkerhet och bränsleförsörjning vid existerande reaktorer.

Nyligen har de svenska universiteten genomgått en generationsväxling inom kärnteknik, och för närvarande ökar verksamheten snabbt, både på grund av ökat forskningsintresse och ökade utbildningsbehov. De ledande forskarna i den nya generationen har alla etablerat sig genom projekt stödda av SKB och Svenskt Kärntekniskt Centrum vid KTH, och de flesta av dem har deltagit i forskningen om separation och transmutation. Därmed har denna forskning redan spelat en avgörande roll för den svenska kärntekniska kompetensen.

Program

Målen för SKB:s forskning rörande separation och transmutation av långlivade radioaktiva ämnen är liksom tidigare att:

- Granska hur denna teknik utvecklas och hur den kan komma att påverka avfallsströmmar från kärntekniska anläggningar och deras nuklidinnehåll.
- Stödja svenska universitet för att de ska kunna delta i större internationella projekt inom området och därigenom bygga kompetens inom kunskapsområden av betydelse för SKB:s kärnverksamhet.
- Bedöma om och i så fall hur och när detta kan utnyttjas för att förenkla, förbättra eller utveckla ett system för att slutligt ta om hand kärnbränsleavfallet från de svenska kärnkraftverken.

SKB har begränsat sitt engagemang till att omfatta separationsteknik och satsningar på nya bränslen. Underlag tas fram fortlöpande enligt årliga verksamhetsplaner. Samlade bedömningar sker inför viktiga beslut i kärnavfallsprogrammet. Synergier med det av Vetenskapsrådet finansierade forskningsprojektet Genius om fjärde generationens reaktorer liksom samarbetsprojektet med Frankrike inom området har tillvaratagits och förutsätts även framgent.

Tidigare hade Sverige en officiell linje att kärnkraften skulle fasas ut, och då bedrevs forskning inom separation och transmutation som bevakning av alternativ teknik till direktdeponering. I dag är det tillåtet att bygga ny kärnkraft i Sverige, vilket öppnar möjligheten för kärnkraft i ytterligare ett sekel framåt. Det är möjligt att teknikutvecklingen i det tidsperspektivet kan göra betydande framsteg, och det kan inte uteslutas att forskningen inom separation och transmutation kan få konsekvenser långt bortom att utgöra bevakningsområde visavi direktdeponering av använt kärnbränsle. SKB:s insatser har under de senaste åren varit av storleken sex till sju miljoner kronor per år, men har nu halverats eftersom forskning och utveckling av nya reaktorer inte är SKB:s uppgift.

Idén om att transmutera avfallet står i konflikt med principen om att inte upparbeta det använda svenska kärnbränslet. Ett eventuellt beslut om transmutation av det svenska kärnbränsleavfallet ligger därför utanför SKB:s ansvarsområde, och i dagsläget är SKB:s mål att inleda deponering av använt kärnbränsle i ett byggt geologiskt förvar under de nästa två decennierna.

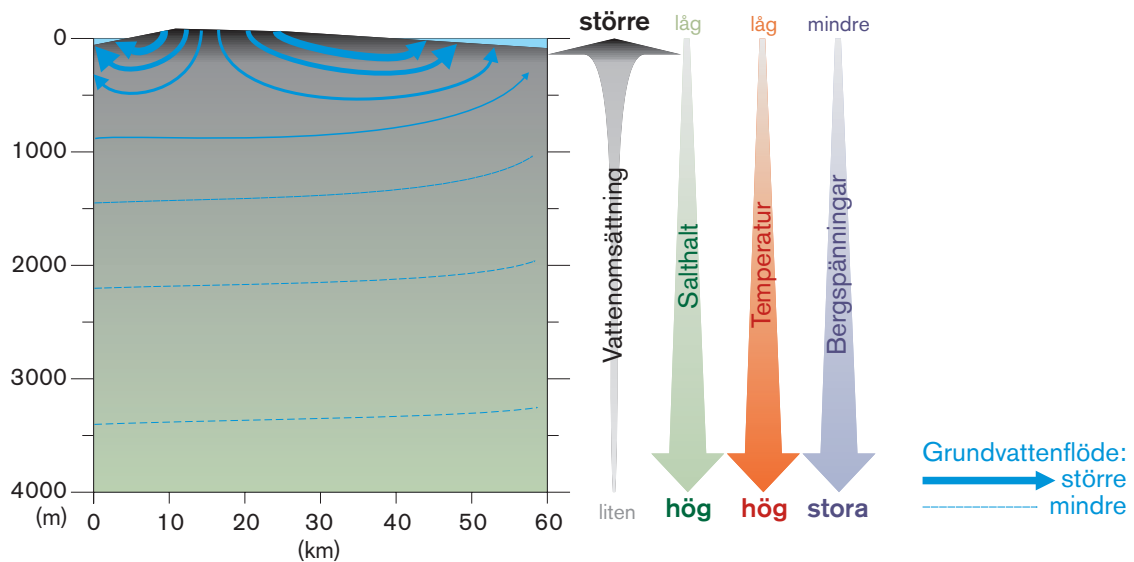
28.2 Djupa borrhål

Konceptet deponering i djupa borrhål innebär att kapslar med använt kärnbränsle placeras i borrhål på 2–5 kilometers djup. Den övre delen av borrhålen försluts.

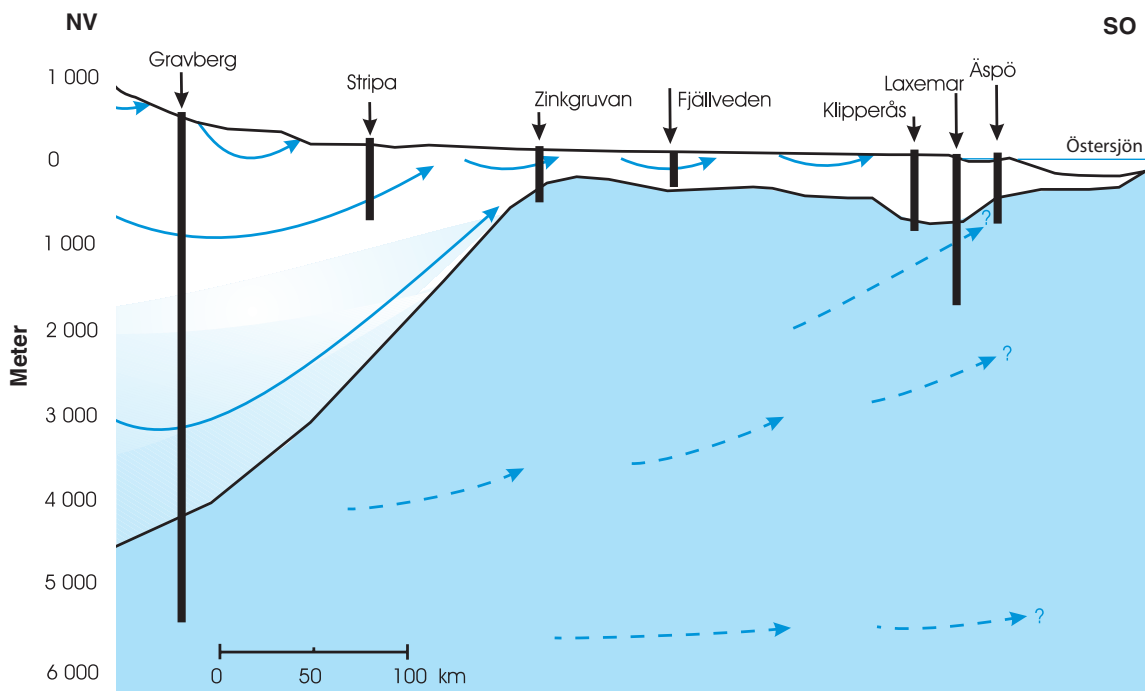
Vid deponering i djupa borrhål är det berget som är den viktigaste barriären för att isolera avfallet och förhindra att radioaktiva ämnen sprids till biosfären. Konceptet bygger på antagandet att grundvattenförhållandena är stagnanta på stora djup. Anledningen till de stagnanta förhållandena är att grundvattnet har hög salthalt (och därmed också hög densitet) vilket ger en stabil skiktning som motverkar omblandning med det lättare sötvattnet som ligger ovanför. Figur 28-2 visar översiktligt hur egenskaper som vattenomsättning, salthalt, temperatur och bergspänningar förändras med djupet.

Ett förslag på en konceptuell modell för de översta fem kilometerna av berggrunden i Sverige finns i figur 28-3 (Juhlin et al. 1998). De eventuella grundvattenrörelser som sker på stort djup tros inte ha någon kontakt med markytan. Därmed skulle inte heller några radioaktiva ämnen från deponerat använt kärnbränsle kunna föras upp till ytan med grundvattnets hjälp.

I det koncept som SKB tidigare presenterat kapslas det använda bränslet in i kapslar med en ytterdiameter av 0,5 meter som var och en rymmer fyra BWR-element alternativt ett PWR-element (SKB 2000b). Detta kräver borrhål med en diameter av 800 millimeter på förvarsdjup. Kapslarna staplas ovanpå varandra i en deponeringszon på mellan två och fyra kilometers djup. I ett deponeringshål ryms på detta sätt omkring 300 kapslar vilket innebär att det krävs cirka 60 deponeringshål för att rymma det använda bränslet motsvarande det driftscenario som ger 6 000 kopparkapslar enligt KBS-3-metoden.



Figur 28-2. Schematisk bild över hur den svenska berggrundens egenskaper förändras med djupet.



Figur 28-3. Schematisk bild av vattencirkulation och variationer i salthalt längs en profil från norra Dalarna till östra Småland (Juhlin et al. 1998).

Sandia National Laboratories, ett av USA:s energidepartements laboratorier, har under 2009 och 2011 publicerat rapporter om deponering av radioaktivt avfall i djupa borrhål (Brady et al. 2009, Arnold et al. 2011). I Brady et al. (2009) föreslås hålen vara fem kilometer djupa med 445 millimeters diameter på förvaringsdjup. Sådana hål kan enligt rapporten borras med befintlig borrhårustning av den typ som används vid borrning av geotermiska borrhål. Förslaget i Arnold et al. (2011) baseras på borrhål med något mindre diameter på förvaringsdjup, 432 millimeter.

Deponeringen av kapslar sker i kristallint berg. Ovanliggande lager kan utgöras av sedimentära formationer. Sådana formationer finns på flera ställen i USA, varför slutförvaring skulle kunna ske på flera platser i anslutning till lokala lager och kärnreaktorer. Därigenom minskas transportbehovet.

I Arnold et al. (2011) föreslås kapslarna skarvas ihop med varandra till en 200 meter lång sträng med 40 kapslar som sänks ned i borrhålet. När kapselsträngen har kommit ned till botten installeras en mekanisk plugg som täpper till hålet cirka 0,5 meter ovanför översta kapseln. Ovanpå pluggen gjuts en 10 meter lång betongplugg för nästa kapselsträng att landa på. Förfarandet upprepas 10 gånger till dess att deponeringszonen (3 000–5 000 meter) är fylld med totalt 400 kapslar.

Efter att deponeringszonen har fyllts med kapslar och mellanliggande pluggar, avslutas deponeringsarbetet genom att gjuta en betongplugg. Efter att foderröret tagits upp är sektionen 3 000 till 1 500 meter frilagd och pluggas med betongpluggar, ballast och bentonit om vartannat. Den övre delen av hålet, som fortfarande är klädd med foderrör, pluggas huvudsakligen med betongpluggar.

SKB:s bedömning är att den i Arnold et al. (2011) föreslagna deponeringstekniken är mer genomarbetad och bedöms även vara säkrare än den av SKB tidigare beskrivna metoden (SKB 2000b) samt att metoden eventuellt skulle kunna användas för deponering av kapslar i djupa borrhål.

Avståndet mellan hålen föreslås vara 200 meter. Enligt Brady et al. (2009) utgörs kapslarna av stålror med 340 millimeters ytterdiameter som var och en rymmer ett PWR- eller två BWR-element. Cirka 80 deponeringshål av denna typ skulle krävas för att rymma det använda bränslet från referensscenariot med 50–60 års drift av de svenska kärnkraftverken.

Enligt Brady et al. (2009) och Arnold et al. (2011) ska kapslarna vara tillräckligt starka för att tåla hanteringen under deponeringen, men behöver inga andra inneslutande egenskaper gentemot det radioaktiva avfallet. Detta eftersom det, enligt författarna, inte behövs något långlivat korrosionsskydd av kapseln på plats nere i deponeringszonen då det är den geologiska barriären, med det stillastående salta vattnet, som ska förhindra att radioaktiva ämnen kommer ut i berget. Författarna föreslår att kapslarna tillverkas av stålror av typer och dimensioner som används av och är utvecklade för borrhåndsindustrin.

Slutsatser i Fud 2010 och dess granskning

SKB gjorde samma bedömning i Fud-program 2010 som i Fud-program 2001, 2004 och 2007. Ingenting talar för att deponering i djupa borrhål skulle öka säkerheten för det slutliga omhändertagandet av det använda kärnbränslet. Ett KBS-3-förvar kan, till skillnad mot djupa borrhål, uppföras, drivas och förslutas på ett i alla led kontrollerat och verifierbart sätt. För ett förvar enligt konceptet djupa borrhål finns dessutom stora osäkerheter om förvarets utveckling efter förslutning. Vidare konstaterade SKB att det inte finns något land som förordar deponering i djupa borrhål som förstahandsalternativ för att ta hand om använt kärnbränsle.

I Fud-program 2010 framförde SKB att man senast i samband med ansökningstillfället för Kärnbränsleförvaret kommer att presentera en jämförelse mellan KBS-3-metoden och deponering i djupa borrhål. Slutsatser från rapporten redovisas nedan i avsnitt Nyvunnen kunskap sedan Fud 2010.

Vad gäller fortsatt arbete, framförde SKB att man kommer att fortsätta följa utvecklingen inom ämnesområdet djupa borrhål. Motiv saknas däremot för att genomföra något eget forskningsprogram inom området. Resurserna koncentreras i stället på att realisera ett slutförvar enligt KBS-3-metoden.

I sitt yttrande över Fud-program 2010 framförde SSM att man inte delar SKB:s uppfattning att en utförligare analys av grundvattnets stabilitet på stora djup endast kan genomföras i kvalitativa termer. SSM framförde att SKB tidigare har genomfört kvantitativa studier för att undersöka om uppvärmningen av vattnet på stora djup från kapslarna kan verka som en drivkraft som motverkar salta vattnets benägenhet att inte strömma uppåt (Marsic et al. 2006) och att modelleringsresultaten indikerade att så inte är fallet.

SSM ansåg att SKB ytterligare bör studera osäkerheter i samband med saltvattnets stabilitet på stora djup. Förutom relevanta konceptuella och parameterosäkerheter som delvis adresserats i den tidigare studien bör exempelvis frågor om påverkan av stora gradienter orsakade av en avsmältande inlandsis eller brunnar undersökas.

SSM såg positivt på att SKB planerar att presentera en fördjupad expertbedömning kring genomförbarheten av deponering i djupa borrhål i ansökan.

SSM framförde vidare att SKB inte redovisade några kopplingar mellan deltagandet i Swedish Deep Drilling Program och arbetet med alternativa metoden djupa borrhål.

SSM delade Uppsala universitets synpunkt att ett koncept som endast har berget som skyddande barriär har en allvarlig brist eftersom det inte uppfyller SSM:s föreskriftskrav på ett flerbarriärs-system. Myndigheten ansåg dock fortfarande att de insatser som beskrivs ovan bör genomföras av SKB eftersom det inte principiellt är uteslutet att flera barriärer kan upprätthållas i ett förvar av typ djupa borrhål.

SSM kommer i prövningen av ansökan om ett slutförvar för använt kärnbränsle ta ställning till om den presenterade redovisningen av alternativa metoder i ansökan är tillräcklig för att kunna bedöma metodvalsfrågan.

Nyvetenskap sedan Fud 2010

En rapport som redovisar en jämförelse mellan slutförvaring av använt kärnbränsle med KBS-3-metoden och deponering i djupa borrhål har tagits fram (Grundfelt 2010). Syftet har varit att lyfta fram metodskiljande faktorer. Ambitionen har varit att göra jämförelsen så rättvisande som möjligt trots att det föreligger stora skillnader i både kvantitet och kvalitet på dataunderlaget mellan de två metoderna.

Jämförelsen har gjorts med utgångspunkt från ett antal centrala frågeställningar:

- förutsättningar för val av förläggningsplats, förutsättningar för uppförande, deponering och förslutning, kärnteknisk säkerhet vid hantering av inkapslat använt kärnbränsle,
- långsiktig säkerhet för ett förslutet förvar, fysiskt skydd och kärnämneskontroll samt planeringsförutsättningar i form av ledtider, utvecklingsbehov och kostnader.

En övergripande slutsats från rapporten är att det i dag inte finns något som pekar på att en övergång till en planering för deponering i djupa borrhål skulle leda till en säkrare slutförvaring av det använda kärnbränslet än vad KBS-3-metoden ger. Vidare konstateras att KBS-3-metoden ger ett slutligt omhändertagande av det använda kärnbränslet som i alla led är kontrollerbart och verifierbart, medan denna kontrollerbarhet och verifierbarhet i flera avseenden saknas vid deponering i djupa borrhål.

Tekniska förutsättningar för borrhål och deponering

En rapport som beskriver tekniska förutsättningar för borrhål och deponering i djupa borrhål har tagits fram (Odén 2013). Rapporten baseras på en relativt bred genomgång av dagens borrhåls teknik från projektbeskrivningar, artiklar och kontakter inom branschen.

Genomförda borrhål visar att det är möjligt att borra 5 000 meter djupa hål i kristallint berg. Inget av hålen har dock den diameter Sandia förespråkar (445 millimeter) på tänkt förvarsdjup (3 000–5 000 meter) (Brady et al. 2009). Det hål som ligger närmast är ett hål borrar i södra Tyskland, som har en diameter av 375 millimeter ned till 6 000 meters djup.

Det har visat sig vara svårt att borra raka hål. I de flesta hålen var man tvungen att utföra så kallade sidohål, sidetracks, på grund av borrhålsproblem. Undantaget är borrhålet i södra Tyskland som borrades till 7 000 meters djup utan sidetrack. Hålet kunde dessutom borrar rakt ($\pm 0,5$ grad) och vertikalt tack vare aktiv vertikalstyrutrustning. Vidare har det visat sig att problem med spjälkning och utfall är störst under själva borrhålsborrningen. Då borrhålet blivit infodrat blir det normalt stabilt.

Med tanke på borrhål och deponering i djupa borrhål kan följande huvudsakliga slutsatser dras från dessa studier:

- Hålen ska vara vertikala och raka för att det ska gå lätt att få ned foderrör och senare att få ned kapselsträngarna.
- Grenade hål eller sidetracks bör undvikas, då dessa skulle försvåra deponeringen.
- Hålen borrar med styrd borrhål som ger max avvikelse på 0,5 grad.

Kombinationen att borra både djupt och med stor diameter i kristallint berg är mindre vanlig och har främst förekommit i olika forskningsprojekt. De flesta av dessa borrhåll utfördes för ett antal år sedan. Genom det relativt nyligen ökade intresset för geotermisk energi har borrhållstekniken utvecklats och det finns i dag utrustning för att borra ned till fem kilometer med en håldiameter på 445 millimeter i kristallint berg med max 0,5 graders avvikelse. Detta förutsätter att hållen borrar med aktiv vertikalstyrning.

Erfarenheterna från att borra fem kilometer djupa hål i kristallint berg är trots allt mycket begränsad. De tekniska problemen är betydande och man får räkna med att en väsentlig andel av borrhållen inte skulle kunna utnyttjas för deponering, åtminstone inte inledningsvis. Något som är av stor ekonomisk betydelse.

Avstånd mellan borrhål

Det arealbehov som skulle erfordras för ett förvar enligt konceptet djupa borrhål styrs av avståndet mellan borrhållen, mängden bränsle som ska deponeras och storleken på kapslarna. I tidigare studier har ett avstånd av 500 meter antagits vara nödvändigt med hänsyn till risken för "kollision" mellan borrhål som avviker från vertikal riktning och till värmeutvecklingen i det deponerade bränslet (SKB 2000b).

Med aktiv vertikalstyrning skulle borrhållen, ur borrhållsteknisk synpunkt, kunna ligga några tiotal meter från varandra utan risk för "kollision" (Odén 2013). Beräkningar av värmeutveckling indikerar att avståndet mellan borrhållen åtminstone skulle kunna minskas till cirka 100 meter (Marsic och Grundfelt 2013a). Om hållen placeras närmare varandra skulle borrhållen termiskt påverka varandra i högre grad.

Grundvattenströmning och gasbildning

I beräkningarna med värmeutveckling studerades även känsligheten med avseende på hydrauliska egenskaper i borrhålet (Marsic och Grundfelt 2013a). En ökad hydraulisk konduktivitet visade sig ha en avsevärd betydelse för vattenströmningen i och nära borrhållen vilket leder till viss omblandning vid gränsskiktet mellan salt och sött grundvatten. De beräknade transporttiderna för grundvatten från deponeringszonen till ovanliggande lager är dock längre än uppvärmningens varaktighet.

Det kommer att finnas stora mängder stål i ett djupt borrhål. Förutom att kapslarna antagits bestå av stål kommer även foderrören att vara av stål. Det kommer således att förekomma korrosion med tillhörande vätgasbildning. Vätkäslan kommer att stiga uppåt och skapa en drivkraft för uppåtriktad strömning i bentonitlurryn i borrhålet och i grundvattnet runt hålet. Konsekvenserna av detta har inte beräknats kvantitativt men kan vara väsentliga eftersom stora mängder vätkäslan kan bildas.

Konsekvenser av hanteringsmissöden

Med tanke på själva genomförandet, borrhållsteknik och deponering, och de långtgående kraven på kärnteknisk säkerhet och strålskydd bedöms en akilleshäla för djupa borrhåll vara risken att skada redan deponerade kapslar eller att fastna med kapselsträngen eller delar av den ovanför deponeringszonen utan att få loss den. Risken att detta ska ske bedöms dock vara väsentligt lägre med förfarandet beskrivet i Arnold et al. (2011) än med tidigare studerade deponeringsförfaranden, till exempel SKB (2000b). Detta eftersom diametern reducerats och kapslarna sätts ned i strängar med 40 ihopkopplade kapslar som inte riskerar att skada redan deponerade kapslar.

Scenariot kan resultera i att man får plugga och tillsluta hålet ovanför den fastnade kapseln. Är kapseln i sektion med rörligt grundvatten kommer det att resultera i radioaktivt läckage om kapseln är trasig eller senast då den har korroderat.

Konsekvenserna av ett sådant scenario har analyserats i Grundfelt (2013). Analysen visar att sannolikheten för ett sådant olycksscenario måste vara lägre än i storleksordningen 10^{-5} – 10^{-4} per hål för att inte SSM:s riskkriterium ska överskridas.

Geovetenskaplig information från djupa borrhål

Rapport om geovetenskaplig information från djupa borrhål har tagits fram (Marsic och Grundfelt 2013b). Arbetet är en uppdatering av den sammanställning SKB tog fram 2004 om geovetenskaplig information för att bedöma möjligheten av att deponera radioaktivt avfall i fyra till fem kilometer djupa borrhål (Smellie 2004). I förhållande till tidigare genomgångar har endast ett borrhål med relevans för deponering i djupa borrhål i den Fennoskandiska urbergsskölden påträffats. Data från detta hål, som är beläget vid Outokumpu i östra Finland, visar att det finns grundvattenfyllda sprickzoner även på stora djup (ner till 2 500 meter). Vattnet i dess sprickor håller en relativt hög salthalt och grundvattenkemin i övrigt visar att detta djupa grundvatten inte har haft kontakt med ytligare vatten på mycket länge.

Saltskiktets stabilitet

Förändringarna hos klimatrelaterade processer såsom bildning av permafrost, smältning av inlandsis och förskjutning av strandlinjen som beskrivs för den cirka 100 000-åriga referensutvecklingen av ett KBS-3-förvar, gäller även vid en analys av deponering i djupa borrhål. Förutsättningarna för slutförvaret att klara av de ökade påfrestningarna i anslutning till nedisning är emellertid väsentligt annorlunda.

Vid deponering i djupa borrhål är fördröjningen på grund av den förväntat mycket långsamma omsättningen av grundvattnet slutförvarets huvudsakliga säkerhetsfunktion, medan de tekniska barriärerna, kapseln, bufferten och förslutningen, inte kan förväntas erbjuda något egentligt skydd. Den primära säkerhetsfunktionen kan i samband med framtida nedisningar påverkas av ett förväntat ökat grundvattenflöde (inklusive nedträngning av smältvatten med låg salthalt), av permafrost och av glacialt initierade jordskalv. Med dagens kunskap kan vissa saker sägas om de initierande processerna, men mycket litet om effekterna på slutförvarets långsiktiga säkerhet.

Stora förändringar i grundvattenflöde i ett 100 000-års perspektiv förväntas bland annat i samband med nedisningar. Den största påverkan på den hydrauliska gradienten och därmed på grundvattenrörelsen, fås när den branta isfronten avancerar eller drar sig tillbaka över förvarsområdet, se bland annat Vidstrand et al. (2010a, b). Effekterna dämpas dock av att isfrontens rörelse sker över ett permafrostlandskap och att tillbakadragandet sker med en betydligt flackare isfront samt dessutom med en förhöjd havsnivå (Vidstrand et al. 2010a, b, SKB 2006c, 2010w).

I samband med isfrontens passage över ett förvarsområde är det troligt att övergångszonen mellan det ytliga grundvattnet med låg salthalt och det djupare liggande salta grundvattnet påverkas och såväl upplyftning som förskjutning nedåt är att vänta under isfrontens passage. Detta medför att de stagnanta grundvattenförhållanden som råder på stora djup riskerar att bli mindre stabila. Effekterna kan förväntas bli mindre i den undre delen av ett förvar än i den övre, på grund av det större avståndet till övergångszonen. Resultaten av modellberäkningar av grundvattensituationen under isfrontens avancemang visar kvalitativt att effekter på grundvattnet i form av förändringar i tryck, salthalt och flödes hastigheter är möjliga på djup som motsvarar deponeringszonen (Vidstrand och Rhén 2010). Effekterna på dessa djup är emellertid starkt beroende av vilka egenskaper och salthalter som ansatts i beräkningarna. Det bör samtidigt noteras att inga beräkningar av radionuklidtransport från de djup som är aktuella vid deponering i djupa borrhål har genomförts eftersom det saknas tillräckliga data för att kunna kvantifiera de processer som påverkar en sådan transport.

Program

SKB:s bedömning från tidigare Fud-program kvarstår, det vill säga att deponering i djupa borrhål inte är en realistisk metod för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle. Ett KBS-3-förvar kan, till skillnad mot djupa borrhål, uppföras, drivas och förslutas på ett i alla led kontrollerat och verifierbart sätt.

SKB avser ändå att även fortsättningsvis bevaka utvecklingen inom ämnesområdena borrhål och deponering i djupa borrhål. I den mån resultat framkommer från Swedish Deep Drilling Program som skulle kunna vara relevanta för konceptet djupa borrhål har SKB för avsikt att ta del av dessa.

Del V

Samhällsvetenskaplig forskning

- 29 SKB:s program för samhällsforskning
- 30 Informationsbevarande över generationer

29 SKB:s program för samhällsforskning

29.1 Översikt

Redan under de förstudier som SKB genomförde 1993–2000 i åtta kommuner ägnades samhällsaspekter ett betydande intresse. I förstudierrapporterna finns beskrivningar och analyser av befolkningsutveckling, näringsliv, psykosociala aspekter, arbetsmarknad, kommunernas verksamhet och ekonomi, kommunikationer, turism, fastighetspriser med mera. Rapporterna innehåller prognoser och bedömningar av utvecklingen i kommunen och regionen, både med och utan etableringen av ett slutförvar för använt kärnbränsle. Detta material har dock mer karaktär av kvalificerat utredningsarbete än av forskning.

Under perioden 2002–2009, då platsundersökningar skedde i Oskarshamns och Östhammars kommuner, definierade SKB i nära samverkan och dialog med de båda kommunerna ett program för så kallade samhällsutredningar (ibland användes termen samhällsstudier), vilka skulle tas fram som en del av platsundersökningarna. Även detta material har mer karaktär av kvalificerat utredningsarbete än av forskning.

Parallellt med dessa samhällsutredningar genomförde SKB mellan 2004 och 2011 ett program för samhällsforskning. Syftet med detta var att:

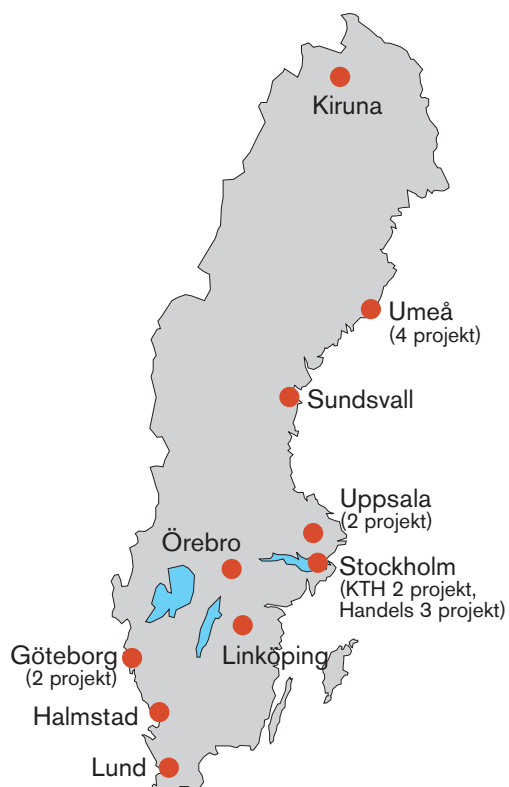
- Bredda perspektivet på kärnbränsleprogrammets samhällsaspekter. Därmed skulle möjligheterna att utvärdera och bedöma programmet i ett större sammanhang underlättas.
- Ge djupare kunskap och bättre underlag för plats- och projektanknutna utredningar och analyser. Därmed skulle kunskap och resultat från samhällsforskningen utnyttjas till att höja kvaliteten på olika beslutsunderlag.
- Bidra med underlag och analyser till forskning som rör samhällsaspekter av stora industri- och infrastrukturprojekt. Därmed skulle kärnbränsleprogrammets erfarenheter tas tillvara för andra likartade projekt.

Programmet delades in i fyra forskningsområden:

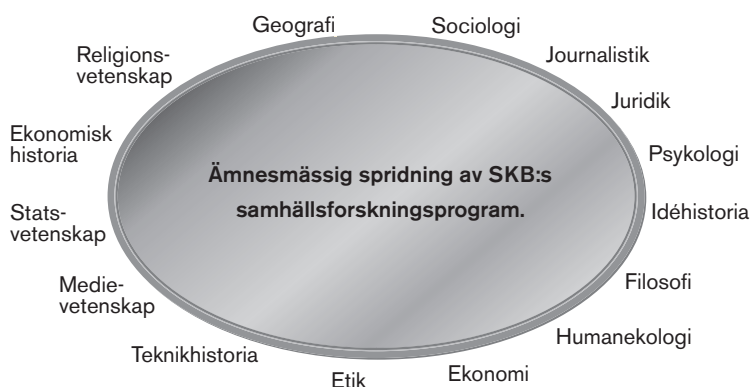
- Socioekonomisk påverkan – samhällsekonomiska effekter.
- Beslutsprocesser.
- Opinion och attityder – psykosociala effekter.
- Omvärldsförändringar.

Avgränsningen mellan dessa forskningsområden har inte varit strikt. Sammantaget inrymde SKB:s samhällsforskningsprogram forskning inom såväl olika samhällsvetenskaper som humaniora och juridik. Det rörde sig om frågeställningar som behandlas inom ämnen som bland andra beteendevetenskaper, ekonomi, filosofi, politik/statsvetenskap samt svensk och internationell rätt.

En första inbjudan att komma in med idéskisser och projektbeskrivningar inom de fyra forskningsområdena skickades våren 2004 ut till ett antal universitet och högskolor. Ytterligare utlysningar genomfördes under 2005–2009. Inkomna idéskisser och projektbeskrivningar bedömdes av en beredningsgrupp som SKB hade tillsatt. Gruppen bestod av tre välrenommerade forskare med intresse för samhällsvetenskapliga frågeställningar. Sammanlagt 18 projekt valdes ut efter förslag från olika forskare, tilldelades medel och genomfördes. Projekten berörde 15 olika vetenskapliga discipliner och engagerade 23 olika forskare från tio universitet och högskolor, se figur 29-1 och 29-2.



Figur 29-1. Geografisk spridning av samhällsforskningsprogrammet.



Figur 29-2. Ämnesmässig spridning av samhällsforskningsprogrammet.

Kostnaderna för det genomförda samhällsvetenskapliga forskningsprogrammet har uppgått till cirka 25 miljoner kronor.

Redovisningar av vad som åstadkommit inom ramen för programmet har successivt publicerats i olika former. Under 2005–2010 gav SKB ut populärvetenskapliga böcker som innehöll en avrapportering av pågående och nyligen avslutade projekt (SKB 2005, 2006g, 2007b, 2008d, 2009d, 2010v). Slutrapporter från de olika projekten publicerades som SKB-rapporter och i ett fall i bokform (Andersson-Skog 2007, Anshelm 2006, Cramér et al. 2007, 2010, Egan Sjölander 2007, Frostenson 2008, 2010, Hansson 2010, 2012, Johansson och Lisberg Jensen 2006, Kaijser och Högselius 2007, Keskitalo et al. 2009, Lindgren och Strömgren 2007, Nord och Stúr 2010, Pettersson 2008, Sandberg 2008, Sjöberg 2006, 2008, Soneryd och Lidskog 2006). Därutöver fanns i Fud-program 2007 och Fud-program 2010 redogörelser för de slutrapporter från forskningsprojekt som förelåg när respektive Fud-program färdigställdes. De slutrapporter som publicerats senare redovisas i avsnitt 29.3.

År 2009 gav SKB ut en skrift som innehöll dels beredningsgruppens sammanfattande kommentarer till forskningsprogrammet, dels översiktliga presentationer av projekten (SKB 2009e). En aktualiserad version publicerades våren 2011 (SKB 2011f), också i engelsk översättning (SKB 2011g), inför en internationell konferens, som markerade avslutningen av SKB:s samhällsvetenskapliga forskningsprogram.

SKB har därefter låtit göra en utvärdering av programmet. Resultatet av utvärderingen förelåg 2012 (Söderberg 2012), se avsnitt 29.4.2.

SKB menar att forskningsresultaten har bidragit till en djupare förståelse av historiska, ekonomiska och opinionsmässiga aspekter på frågor relaterade till slutförvaring av använt kärnbränsle och därmed bidragit till att öka den allmänna kunskapsbasen för SKB:s arbete. Resultaten har även kommit till användning i SKB:s praktiska arbete, se vidare avsnitt 29.5.

29.2 Slutsatser i Fud-program 2010 och dess granskning

29.2.1 SKB:s redovisning

SKB redogjorde för sin syn på ett antal övergripande frågor med anknytning till det samhällsvetenskapliga forskningsprogrammet i Fud-program 2010 kapitel 28. I kapitel 29–32 redovisades resultat från de forskningsprojekt som hade avslutats eller pågick inom vart och ett av de fyra forskningsområdena.

Resonemanget kring övergripande frågor knöt an till de synpunkter som hade framkommit vid granskningen av Fud-program 2007 och kan sammanfattas enligt följande.

Relationen mellan forskning och övriga dokument

Statens kärnkraftinspektion hade i yttrandet över Fud-program 2007 efterlyst ytterligare klargöranden om hur relationen mellan samhällsforskning, tillståndsansökningar, MKB-dokument och utredningsverksamheten ser ut. SKB framhöll i Fud-program 2010 att MKB-dokumentet ska beskriva den sökta verksamhetens konsekvenser för människa och miljö. Syftet med samhällsforskningsprogrammet är däremot att belysa olika samhällsaspekter och ge breddat kunskapsunderlag om politiska och sociala aspekter inför prövningen av ansökningarna för slutförvaret för använt kärnbränsle. Målgruppen för forskningsprogrammet är framför allt beslutsfattare, lokalt och nationellt. Programmet är fristående från såväl MKB som ansökningar. Skillnaden mellan det samhällsvetenskapliga forskningsprogrammet och samhällsutredningar beskrev SKB på ungefär samma sätt som i Fud-program 2007.

Kärnavfallsrådet hade i sitt yttrande över Fud-program 2007 föreslagit att forskningsprogrammet skulle kompletteras med studier av framtida ekonomiska konsekvenser av kärnavfallsfrågans hantering och ett forskningsfält som belyser omvärldsförändringar och säkerhetskultur. Vidare hade rådet uttalat sig för att det samhällsvetenskapliga forskningsprogrammet borde fortsätta efter att ansökningarna om tillstånd, enligt miljöbalken och kärntekniklagen, att anlägga slutförvaret för använt kärnbränsle hade lämnats in. SKB förklarade i Fud-program 2010 att avsikten var att under 2011 ta fram en rapport (i svensk och engelsk version) för att ge en sammanfattande värdering av samhällsforskningsprogrammets hittillsvarande verksamhet samt de behov av framtida forskning som kan finnas. Denna skrift utgavs som planerat (SKB 2011f respektive SKB 2011g). SKB aviserade även en internationell konferens våren 2011 för diskussion bland annat om de resultat som framkommit. Först därefter skulle SKB komma att bedöma framtida forskningsbehov utifrån de förutsättningar som gäller, under och efter, tillståndsprövning och beslut.

Arbetsformer

SKB erinrade om att den första utlysningen av forskningsmedel inom ramen för samhällsforskningsprogrammet genomfördes 2004 och att programmet sedan hade byggts upp successivt i dialog med bland annat berörda kommuner. Bland andra Kärnavfallsrådet hade tidigare påpekat vikten av att även andra aktörer än SKB finansierade samhällsforskning kring kärnavfallsfrågorna. I Fud-program 2010 underströk SKB att det skulle vara till gagn för hela forskningsfältet om även andra aktörer än SKB tog initiativ i denna riktning och fortsatte, se Fud-program 2010, sidan 399: ”Hur en industri

rent praktiskt arbetar med ett forskningsprogram är viktigt. Om inte forskarvärlden och omvärlden i övrigt uppfattar de vetenskapliga resultaten som självständiga i förhållande till finansiären, kan de förlora mycket av sitt värde. Oberoende av om ett projekt finansieras av ett forskningsråd, ett universitet, en intressegrupp eller en industri ska forskningsresultaten bli desamma, om övriga faktorer är konstanta.”

SKB upprepade vidare vad man i Fud-program 2007 framhållit om att forskarna själva formulerar sina forskningsfrågor och ansvarar för metodik, resultat och slutsatser.

Vidare redogjorde SKB för utlysningförfarandet, för de viktigaste kriterierna för att få medel beviljade samt för den ämnesmässiga och geografiska spridningen mellan olika universitet av de 18 projekt som programmet hade resulterat i.

29.2.2 Granskningssynpunkter

Såväl Strålsäkerhetsmyndigheten som Kärnavfallsrådet kommenterade vid sin granskning av Fud-program 2010 vad SKB hade anfört om programmet för samhällsforskning. Synpunkter framfördes även till Strålsäkerhetsmyndigheten i remissyttranden från berörda kommuner, statliga myndigheter och andra organisationer. I huvudsak framkom följande.

Sammanfattningsvis ansåg Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM 2011) att det är positivt att SKB bedriver samhällsvetenskaplig forskning inom ramen för sitt kärnbränsleprogram. Forskningen ger en ökad förståelse för den ekonomiska och sociala dimensionen av slutförvaret för använt kärnbränsle och bidrar därmed till en helhetsbild av slutförvarsprocessen. Myndigheten noterade att den uppfattningen delades av nästan alla remissinstanser som yttrat sig i frågan. Dock ansåg myndigheten att SKB tydligare bör redogöra dels för vilken roll det samhällsvetenskapliga forskningsprogrammet har i förhållande till SKB:s övriga verksamhet inom ramen för kärnbränsleprogrammet, dels för vilken nytta SKB har och har haft av den samhällsvetenskapliga forskningen.

Kärnavfallsrådet erinrade i sitt granskningsyttrande (Kärnavfallsrådet 2011) om den diskussion rörande den samhällsvetenskapliga och humanistiska forskningens betydelse för slutförvarsfrågan som pågått i Sverige sedan 1980-talet. Denna diskussion hade i slutet av 1990-talet och början av 2000-talet stimulerat fristående universitetsforskare till arbeten med denna inriktning. Rådet exemplifierade med tre publikationer (Lidskog 1998, Sundqvist 2002, Andrén och Strandberg 2005)³. Vidare erinrade Kärnavfallsrådet om sitt förslag 2002 om ett från SKB fristående program för samhällsvetenskaplig och humanistisk kärnavfallsforskning och att det av SKB sedan 2004 finansierade programmet nu närmade sig sin avslutning.

De synpunkter som Kärnavfallsrådet nu framförde utmynnade i följande fem slutsatser (Kärnavfallsrådet 2011, sidan 105):

- ”Det är rådets uppfattning att SKB på ett otillfredsställande sätt lösgjort sitt samhällsforskningsprogram från sitt grundläggande slutförvaringsuppdrag.
- Det finns ett fortsatt stort behov av samhällsvetenskaplig kärnavfallsforskning, som så långt det är möjligt är (1) fristående från ekonomiska och politiska intressen men samtidigt (2) av relevans för svensk kärnavfallshantering.
- Den framtida forskningen bör bland annat studera konsekvenserna av ökad konkurrens på den globala marknaden om råvaror (till exempel koppar), konsekvenserna av avgörande förändringar i kärnkraftens ägandeförhållanden samt villkoren för samhällelig planering och beslutsfattande.
- Flera av de förändrade förutsättningar som skulle kunna motivera en långtgående omprövning av kärnavfallsprogrammets genomförande och SKB:s huvudtidtabell sammanhänger med olika typer av samhällsförändringar, som skulle kunna göras till föremål för samhällsvetenskaplig forskning.
- Med ledning av SKB:s utvärdering och Kärnavfallsrådets kommande granskning bör regeringen (1) utreda formerna för hur den samhällsvetenskapliga och humanistiska fristående kärnavfallsforskningen ska bedrivas i framtiden och (2) i kommande forskningsproposition tillse att medel från Kärnavfallsfonden avsätts under kommande decennier för samhällsvetenskaplig forskning.”

³ För en förteckning över samhällsvetenskapligt inriktade arbeten åren 2007–2012 om slutförvaring av använt kärnbränsle utanför ramen av SKB:s forskningsprogram, se Söderberg (2012, bilaga 16).

Det beslut som regeringen den 27 oktober 2011 fattade med anledning av granskningen av Fud-program 2010 innehåller inga särskilda uttalanden om SKB:s samhällsforskningsprogram (Regeringsbeslut 2011-10-27).

På inbjudan av SKB utvecklade företrädare för Kärnavfallsrådet vid ett möte i november 2011 delar av den kritik som rådet hade framfört. Det framkom att rådet inte avsåg att ta några ytterligare initiativ i frågan innan rådet getts möjlighet att ta del av resultatet av den utvärdering av samhällsforskningsprogrammet som då pågick på uppdrag av SKB, se avsnitt 29.4.2.

SKB:s slutsatser av granskningen av redovisningen av det samhällsvetenskapliga forskningsprogrammet i Fud-program 2010 framgår av avsnitt 29.5.

29.3 Nyvunnen kunskap sedan Fud-program 2010

I Fud-program 2007 kapitel 30–33 redovisades slutrapporter från de åtta projekt som då hade färdigställts. Motsvarande redovisningar av åtta andra slutrapporter från sju projekt gjordes i Fud-program 2010 kapitel 29–32. Sedan Fud-program 2010 färdigställdes har ytterligare tre slutrapporter publicerats, vilka redovisas här, se avsnitt 29.3.3 och 29.3.5.

29.3.1 Fyra forskningsområden och arton projekt

Sammanlagt har 18 projekt genomförts inom ramen för de fyra forskningsområden som det samhällsvetenskapliga forskningsprogrammet har omfattat. Av följande uppställning (grundad på SKB 2011f) framgår vilka slutrapporter som är hänförliga till dessa 18 projekt (slutrapportens titel överensstämmer i stort sett med projektens benämning). Två av de uppräknade rapporterna (Sandberg 2008, Pettersson 2008) utgör redovisningar från ett och samma forskningsprojekt. Det bör understrykas att flera av projekten har relevans inom mer än det forskningsområde som det har hänförs till.

- Socioekonomisk påverkan – samhällsekonomiska effekter.
 - Växtkraft av kärnkraft? Kärnkraftetableringens socioekonomiska effekter i Oskarshamn och Östhammar 1960–2000 (Andersson-Skog 2007).
 - Slutförvarets lokala effekter på befolkning och sysselsättning i Östhammar och Oskarshamn (Lindgren och Strömgren 2007).
- Beslutsprocesser.
 - Allmänhet, expertis och deliberation – samråd om slutförvar av kärnavfall (Soneryd och Lidskog 2006).
 - Grunden för beslut i kärnavfallsfrågan. Upplevelser av lagstiftningsgrund och MKB-process (Keskitalo et al. 2009).
 - Etiska och filosofiska perspektiv på kärnavfallsfrågan (Hansson 2010).
 - Ansvarstagande i kärnbränslecykelns slutsteg – ett rättsligt perspektiv (Cramér et al. 2010).
 - Från ödesfråga till övrig fråga – en studie av den politiska debatten om kärnavfallet i Sverige 1976–2009 (Nord och Stúr 2010).
- Opinion och attityder – psykosociala effekter.
 - Opinion och attityder till förvaring av använt kärnbränsle (Sjöberg 2006).
 - Identitet och trygghet i tid och rum – Kulturteoretiska perspektiv på kärnavfallsfrågans existentiella dimensioner (Johansson och Lisberg Jensen 2006).
 - Som natt och dag trots samma kärnas ursprung? Om (o)likheter och opinioner i nationella och lokala/regionala mediers hantering av kärnavfallsfrågan (Egan Sjölander 2007).
 - Etisk argumentation i slutförvarsfrågan – Etiska värderingskonflikter i diskussionen om det svenska kärnavfallet (Frostenson 2008).
 - Ungdomars syn på kärnkraft och demokrati sedan 1980-talet – Attitydepidemier, stigberoenden och teknisk kulturrevolution (Sandberg 2008).
 - Attityd till slutförvar av använt kärnbränsle – Struktur och orsaker (Sjöberg 2008).

- Omvärldsförändringar.
 - Från energiresurs till kvittblivningsproblem – Frågan om kärnavfallens hantering i det offentliga samtalet i Sverige 1950–2002 (Anshelm 2006).
 - Nationellt ansvar för använt kärnbränsle i en utvidgad europeisk union? (Cramér et al. 2007).
 - Resurs eller avfall? Politiska beslutsprocesser kring använt kärnbränsle (Kajiser och Högselius 2007).
 - Unga sjunga med de gamla! En jämförande analys av grundläggande värderingar och uppfattningar om demokrati och politik bland blivande vuxna från 24 länder (Pettersson 2008).
 - Slutförvarets industriella organisering – Fallgrop eller följdriktighet (Frostenson 2010).
 - Tidsperspektiven i svenska samhällsbeslut (Hansson 2012).

29.3.2 Socioekonomisk påverkan – samhällsekonomiska effekter

Syftet med forskningen inom området Socioekonomisk påverkan är att öka kunskapen om förståelsen för hur enskilda orters ekonomi och befolkningssammansättning påverkas av att en ny och stor anläggning etableras på orten. Denna kunskap kan i sin tur lämna viktiga bidrag till SKB:s, berörda kommuners och andra intressenters bedömningar av hur etableringen av Kärnbränsleförvaret kan komma att påverka ortens ekonomi och befolkningsutveckling.

Med socioekonomisk utveckling avses både snävt ekonomiska aspekter, som sysselsättning, industri-etablering, företagande, fastighetspriser, kommunal ekonomi och turism samt samhällsekonomiska effekter som resande till och från orten, in- och utflyttning till eller från orten, liksom ortens renommé och attraktionskraft.

De två projekt inom detta forskningsområde som genomförts har redovisats i Fud-program 2007. Utlysningar som gjordes åren 2008 och 2009 resulterade inte i några ytterligare projektansökningar inom området, något som SKB beklagade i Fud-program 2010, (sidan 403).

Slutsatser i Fud-program 2010 och dess granskning

Varken Strålsäkerhetsmyndigheten eller Kärnavfallsrådet har vid sina granskningar av Fud-program 2010 tagit upp frågor kring forskningsområdet Socioekonomisk påverkan – samhällsekonomiska effekter. Några ytterligare projekt inom det forskningsområdet har inte genomförts. SKB:s syn på behovet av ytterligare forskning inom detta område redovisas i avsnitt 29.4.1 och 29.5.

29.3.3 Beslutsprocesser

Lokaliseringen av ett slutförvar för använt kärnbränsle är en kontroversiell fråga, bland annat därför att tidsperspektivet är svårt att överblicka och förstå. Frågan har kopplingar till både lokal samhällsplanering, nationell energipolitik och utvecklingen internationellt. Genom att ta fasta på politiska frågor av denna speciella karaktär var syftet med forskningen att lägga grunden för en generell kunskap och nya perspektiv för bland annat beslutsfattare att väga in i sina beslutsunderlag. Hur beslutsprocessen kring en slutförvarsetablering faktiskt ser ut är en sak och hur den uppfattas är delvis en annan. Det finns både svenska och utländska beslutsprocesser att dra lärdom av, till exempel i vad mån fattade beslut uppfattas som legitima, rättvisa och effektiva.

Slutsatser i Fud-program 2010 och dess granskning

Tre av forskningsprojekten inom området Beslutsprocesser redovisades i Fud-program 2010 och ett fjärde projekt har redovisats i Fud-program 2007. Varken Strålsäkerhetsmyndigheten eller Kärnavfallsrådet har vid sina granskningar av Fud-program 2010 kommenterat redovisningen av dessa. SKB:s syn på behovet av ytterligare forskning inom detta område redovisas i avsnitt 29.4.1 och 29.5.

Ny vunnen kunskap sedan Fud-program 2010

I det följande sammanfattas resultat från det femte forskningsprojektet inom området Beslutsprocesser. Sammanfattningen bygger på den slutrapport som förelåg hösten 2010 (Nord och Stúr 2010).

Från ödesfråga till övrig fråga – en studie av den politiska debatten om kärnavfallet i Sverige, Mittuniversitetet

Projektet Från ödesfråga till övrig fråga – en studie av den politiska debatten om kärnavfallet i Sverige hade som övergripande syfte att undersöka hur förutsättningarna för de politiska beslutsprocesserna i frågan om slutförvaringen av det svenska kärnavfallet påverkas av förändringar i opinionsklimat och omvärldshändelser. I centrum för studien stod därför frågor om hur den nationella politiska debatten samspelar med mediedebatten och den opinionsmässiga dynamik som uppstår när de båda debatterna relaterar till varandra. Särskilt intresse ägnades åt de argument och ståndpunkter som förekommer i politik och medier och hur de refererar till rådande opinionsläge och till förhållanden i omvärlden av politisk, ekonomisk, ekologisk eller teknisk natur. En analys av debatternas arenor och aktörer bedömdes ge värdefull kunskap om hur den politiska dagordningen eller agendan har formats i olika skeenden.

Följande frågeställningar var centrala för studien:

- Vad karakteriserar den parlamentariska och partipolitiska debatten i kärnavfallsfrågan och på vilket sätt har aktörer, ståndpunkter och argument förändrats över tid?
- Vad karakteriserar mediernas opinionsbildning och nyhetsförmedling i kärnavfallsfrågan och på vilket sätt har aktörer, ståndpunkter och argument förändrats över tid?

I undersökningen analyserades debattförloppen vid fyra olika tillfällen, och i samband med fyra riksdagsval under perioden 1976–2009. I det material som analyserades ingår de fyra riksdagspartierna Centerpartiet, Folkpartiet, Moderaterna och Socialdemokraterna. Dessa fyra partier valdes för att de varit representerade i riksdagen under hela den undersökta perioden. Undersökningen genomfördes huvudsakligen genom en kvalitativ textanalys av offentligt tryck, partidokument och medieinnehåll. Den kvalitativa textanalysen kompletterades i viss utsträckning med annan befintlig skriftlig dokumentation som politiska memoarböcker och debattböcker.

Resultatet av undersökningen visar att kärnavfallsfrågan var i centrum för den inrikespolitiska debatten under 1970-talet, men sedan successivt förlorade i politisk betydelse under de följande decennierna. Vad som i början av den studerade perioden närmast kan beskrivas som en politisk ödesfråga var enligt författarna vid slutet av samma period på sin höjd en politikens övriga fråga. Författarna karakteriserar den som en restpost som ägnades ett mycket begränsat intresse och som i det närmaste hade avlägsnats ur den politiska sfären.

Kärnavfallsdebatten kan enligt författarna fungera som en god illustration av en politisk frågas livscykel och illustrera de omständigheter under vilka en fråga kan politiseras under ett skede, för att sedan marginaliseras och försvinna från den politiska dagordningen. Det skrevs till exempel sex gånger så mycket i de ledande fyra dagstidningarna i detta ämne under valrörelsens sista tre veckor 1976 jämfört med valrörelsen 1998. När det gäller antalet riksdagsmotioner om både kärnkraft och kärnavfall hade de under riksdagsåret 2009/2010 mer än halverats jämfört med tio år tidigare. Det rör sig alltså om en fråga som gradvis minskade i opinionsmässig betydelse, såväl när det gällde det politiska arbetet som när det gällde mediebevakningen.

Kärnavfallsfrågans ställning i den svenska politiska debatten kan enligt författarna generellt förklaras med ett opinionsmässigt samspel mellan politik och medier. Detta samspel innebär, skriver författarna, att politikens aktörer gör rationella överväganden och intar ståndpunkter för att maximera det egna inflytandet och för att vinna väljare, hålla ihop det egna partiet eller öka möjligheterna för samarbete med andra partier. Sådana överväganden kan enligt författarna förklara varför kärnkraften och dess miljökonsekvenser blev en så stor fråga vid 1976 års val (då Centern ville politisera frågan), liksom varför den blev en så liten fråga vid 1998 års val (då egentligen alla politiska partier medverkat till att avpolitisera frågan). Det intressanta är hur mediebevakningen i samband med dessa val återspeglar de politiska positionerna och hur följsamt de medielogiska uttolkningarna av de politiska lägena formas.

Författarna menar att kärnavfallsfrågan präglas inte bara av partiernas vilja att politisera eller avpolitisera under olika tidsperioder, utan också av förekomsten av andra miljörelaterade frågor som konkurrerar om partiernas, mediernas och väljarnas uppmärksamhet. Debatten på 1980-talet om algblomning och säldöd samt 2000-talets debatt om det globala klimathotet är sådana frågor som sannolikt påverkar avfallsfrågans ställning hos den politiska opinionsbildningens aktörer.

Den svenska politiska debatten om kärnavfallet är, framhåller författarna, också olik de flesta andra politiska frågor. Den har ingen jämnstark ställning utan går ifrån en extrem till en annan, från 1970-talets oerhört centrala betydelse i debatten om politiken och regeringsalternativen till 2000-talets marginella roll som politisk debattfråga. Den första tidsperiodens gynnsamma omständigheter och ömsesidigt förstärkande opinionsbilder mellan politik och medier kan knappast utgöra en mer slående kontrast till något annat än den senare tidsperiodens ömsesidiga tystnad och avklingande betydelse.

29.3.4 Opinion och attityder – psykosociala effekter

Opinioner och attityder är föränderliga fenomen och präglas av olika drivkrafter liksom av personliga egenskaper. Som fenomen är de därför komplexa att utforska. Etableringen av Kärnbränsleförvaret är dessutom en tidsmässigt utdragen process, med olika aktörer under olika skeden. Syftet med forskningsområdet var att studera hur opinioner och attityder uppkommer och förändras. Denna kunskap kan lämna viktiga bidrag till förståelsen för de olika aktörernas ställningstaganden och planeringen av samråd. Opinioner och attityder är inte bara en spegling av beslutsfattande, faktiska händelser och kommunicerade budskap. Individuella egenskaper och verklighetsuppfattningar spelar också roll. Djupt liggande värderingar och normer, personlig identifikation, upplevda rädslor och oro för risker samt egenintresse är några exempel på faktorer som också har betydelse. Det är därför betydelsefullt att belysa symboliken kring Kärnbränsleförvaret och dess verksamhet.

Slutsatser i Fud-program 2010 och dess granskning

Tre genomförda projekt inom forskningsområdet Opinion och attityder – psykosociala effekter har redovisats i Fud-program 2007. Ytterligare tre slutrapporter från projekt inom området presenterades i Fud-program 2010. Varken Strålsäkerhetsmyndigheten eller Kärnavfallsrådet har vid sina granskningar kommenterat redovisningarna av dessa. Några ytterligare projekt inom det nu aktuella forskningsområdet har inte genomförts. SKB:s bedömning av behovet av ytterligare forskning inom detta område redovisas i avsnitt 29.4.1 och 29.5.

29.3.5 Omvärldsförändringar

Etableringen av ett slutförvar för använt kärnbränsle är ett unikt projekt med speciella kännetecken. Till slut är det bara en ort i Sverige som blir aktuell. SKB valde 2009 Forsmark i Östhammars kommun som plats för Kärnbränsleförvaret. Samtidigt hänger etableringsfrågan mycket tydligt samman med förändringar i omvärlden. Syftet med forskningsområdet var att öka kunskapen om relevanta omvärldsfaktorer och om omvärldsförändringar. Denna kunskap kan vara värdefull som tillskott till planering, utredningar, samråd och beslutsfattande inför och efter tillståndsansökningarna. Kunskapen kan också vara viktig för den framtida driften av slutförvarsanläggningen. Den enskilda ortens ekonomiska situation och utveckling beror på en mängd olika omständigheter i omvärlden. Hur ser den framtida svenska stat ut, som ska ta ansvaret för slutförvaret efter förslutning? Lagstiftning, reglering och finansiering, liksom landets ekonomiska situation, påverkar. En annan viktig faktor är Sveriges deltagande i utvecklingen av det europeiska politiska och ekonomiska samarbetet. Hur ser Sveriges relation till EU ut om 30 år? Hur ser EU ut om 30 år? Vad kommer en framtida europeisk integration i allmänhet att innebära för kärnavfallshanteringen och i vilken mån kommer detta att påverka den specifikt svenska hanteringen?

Slutsatser i Fud-program 2010 och dess granskning

Två projekt inom forskningsområdet Omvärldsförändringar har redovisats i Fud-program 2007. Ytterligare två slutrapporter från projekt inom detta forskningsområde presenterades i Fud-program 2010. Varken Strålsäkerhetsmyndigheten eller Kärnavfallsrådet har vid sina granskningar kommenterat redovisningen av dessa. SKB:s syn på behovet av ytterligare forskning inom detta område redovisas i avsnitt 29.4.1 och 29.5.

Nyvetenskap sedan Fud-program 2010

I det följande sammanfattas slutrapporter från ett femte och ett sjätte forskningsprojekt inom ramen för forskningsområde Omvärldsförändringar. Sammanfattningarna bygger på slutrapporter som förelåg hösten 2010 (Frostenson 2010) respektive hösten 2012 (Hansson 2012).

Slutförvarets industriella organisering – fallgrop eller följdriktighet, Uppsala universitet

En översiktlig presentation av forskningsprojektet Slutförvarets industriella organisering – fallgrop eller följdriktighet ingick i Fud-program 2010, kapitel 30. Tre frågor hade ställts (Frostenson 2010):

- Hur kommer slutförvarsprojektet att organiseras operativt och strukturellt över tiden?
- Varför väljer SKB att organisera slutförvarsprojektet på detta sätt?
- Vilken kontextuell organisering äger rum i slutförvarsprojektet och vilka konsekvenser får denna?

Den överordnade ambitionen i forskningsprojektet var sålunda att kartlägga och tydliggöra företagsorganisatoriska förhållanden för de enheter som ingår i det kommande slutförvarsprojektet och att identifiera och analysera organisations- och ägarstyrningsproblem i detta. Med kontextuell organisering syftade författaren på att fördjupade aktörsrelationer etableras mellan SKB:s ägare och SKB å ena sidan och kommunerna Östhammar och Oskarshamn å andra sidan och att SKB:s egen organisation påverkas av dessa förhållanden.

Hur de olika industriella enheterna i slutförvarsprojektet kan drivas och vilken struktur, till exempel i fråga om ägande och integration av enheter som väljs, diskuteras i rapporten. Varför SKB väljer att organisera slutförvarsprojektet på ett visst sätt visas också. Genom aktiv organisering blir slutförvarsarenan trängre och frågan om slutförvaret förvandlas till en i mångt och mycket lokal fråga, menar författaren. Det finns en tydlig tendens att SKB:s roller mångfaldigas för att på bästa sätt kunna hantera de krav som centrala intressenter – särskilt kommunerna – har på slutförvarsprojektets organisering.

Tidsperspektiven i svenska samhällsbeslut, Kungliga Tekniska högskolan Stockholm

Slutrapporten Tidsperspektiven i svenska samhällsbeslut (Hansson 2012) utgörs av en översikt över problem och principer i samband med beslutsfattande som har effekter i framtiden. Den är uppdelad i en teoretisk och en empirisk del.

I den teoretiska delen diskuteras några olika metoder och principer för att värdera framtida utfall av de beslut vi fattar i dag. En vanlig metod är diskontering som innebär att man räknar med en årlig ränta på samma sätt som i vanliga ekonomiska kalkyler. För att kunna göra det måste man översätta alla värden till pengar, även till exempel förluster av människoliv och miljövärden. En av svårigheterna med diskontering är att vi inte har några allmänt accepterade metoder för att fastställa sådana penningvärden. En annan svårighet är att diskontering leder till absurda resultat om den tillämpas över längre tidsperioder. Om vi använder en kalkylränta om tre procent kommer till exempel en handling som leder till att tio miljarder människor dör år 2800 att betraktas som mindre allvarlig än en handling som leder till en enda persons omedelbara död.

En annan princip för bedömningen av framtida effekter är den om hållbar utveckling. Medan diskontering är ett mycket precist begrepp, är det betydligt svårare att i exakta termer klargöra vad hållbar utveckling innebär. Man brukar skilja mellan två huvudsakliga uttolkningar, svag och stark hållbarhet. Med svag hållbarhet menas att vi ska möta den nuvarande generationens behov, utan att försvåra för kommande generationer att möta sina behov. Då är det tillåtet att man tömmer ut en naturresurs, om man bara ser till att ersätta den med något annat, till exempel en ny teknik som kommande generationer kan använda i stället. Enligt stark hållbarhet ska man se till varje resurs för sig, och ställa bevarandekrav om var och en av dem.

I rapporten förordas att man bör skilja mellan olika typer av naturresurser. Rent tekniska naturresurser kan hanteras med svag hållbarhet och därför också med den vanliga diskonteringsmodellen, givet att tidsrymderna är så korta att vi kan förutsätta en räntekonomi liknande den nuvarande. Andra resurser, i synnerhet de som avser biologisk mångfald, bör i stället behandlas med det starka hållbarhetsbegreppet.

Två ytterligare principer diskuteras mera kortfattat. Den ena är den moralfilosofiska diskussionen, som främst har handlat om de beslut människor fattar om sin egen framtid. De flesta filosofer som yttrat sig i frågan har ansett att, eftersom olika tidpunkter tillhör en människas liv i lika stor utsträckning, är det oförnuftigt att föredra en fördel nu framför samma fördel vid någon senare tidpunkt. Den andra principen är osäkerhetsdiskontering, som bygger på att vi brukar anse oss ha goda skäl att fästa mindre vikt vid osäkra nyttor och skador än vid sådana som är säkra. Ju längre in i framtiden en händelse förväntas inträffa, desto osäkrare är den i regel. I praktiken kommer därför osäkerhetsreducering att få delvis samma effekt som tidsdiskontering.

I den empiriska delen har intervjuer gjorts med svenska myndigheter och sektorsföreträdare om dels deras tidshorisonter, det vill säga hur långt in i framtiden de analyserar och planerar, dels deras ekonomiska värderingsverktyg, i synnerhet diskonteringsräntor.

Vid intervjuerna framkom stora skillnader mellan de tidshorisonter som tillämpas inom olika samhällssektorer. Inom de allra flesta områden är planeringshorisonten kortare än 30 år. I några miljöfrågor, främst de som gäller klimatförändringar, skogen och arters fortbestånd, förekommer en tidshorizont på 100 år. Omhändertagandet av använt kärnbränsle visade sig vara det enda område, där utförliga analyser regelmässigt utförs med en tidshorizont längre än 100 år. Här är perspektivet å andra sidan så långt som 1 000 000 år eller längre. Den långa tidshorisonten motiveras av tillförlitlig vetenskaplig information om varaktigheten i bränslets farlighet.

Till en del beror dessa skillnader i tidshorizont på olikheter i kunskapsunderlag och planeringsbehov, men det verkar också finnas svärmotiverade skillnader mellan olika samhällsområden. Bristen på systematik är slående, och i flera fall vore det klokt, menar rapportens författare, att överväga möjligheten av analyser i ett längre tidsperspektiv än som nu utförs. Detta gäller särskilt när man har att göra med allvarliga och irreversibla förändringar, till exempel frågor om arters fortbestånd och jordens framtida klimatutveckling.

Vid intervjuerna framkom också en anmärkningsvärd brist på systematik i valet av diskonteringsränta. Trafiksektorns diskonteringsräntor har av tradition ett stort inflytande även långt utanför trafikområdet. Trafikverkets ekonomer gör ett gediget underlagsarbete, men de har självfallet ett starkt fokus på trafiksektorn. Den diskonteringsränta om fyra procent som härrör från trafiksektorn framstår enligt författaren som anmärkningsvärt hög när den ska tillämpas till exempel på miljöskador i ett hundraårsperspektiv. Den betyder till exempel att en negativ effekt av klimatpåverkan som inträffar om 100 år ska räknas som endast en 1/50 så allvarlig som om den hade inträffat i dag.

Användningen av diskonteringsräntor i statliga myndigheter framstår, sägs det i rapporten, som otillräckligt genomtänkt och motiverad. Det finns anledning att noga överväga alternativa förhållningssätt, däribland det ovan nämnda förslaget att tillämpa traditionell ekonomisk diskontering enbart på ekonomiska nyttigheter och övergå till andra beräkningssätt för sådant som saknar ett marknadspris, till exempel människoliv, hälsa och miljövärden. Ett sådant synsätt tillämpas i praktiken redan inom kärnavfallsområdet. De ekonomiska kostnaderna för Kärnbränsleförvaret diskonteras på gängse sätt, medan däremot framtida miljö- och hälsoeffekter inte diskonteras utan betraktas som lika allvarliga som om de hade inträffat i dag. Detta förhållningssätt synes svara väl mot idealet om hållbar utveckling och mot allmänt accepterade synsätt på vårt ansvar för kommande generationer. Det finns mycket starka skäl att tillämpa det även fortsättningsvis inom kärnavfallsområdet. Dessutom finns det starka skäl att pröva detta synsätt även inom andra områden där vi har långsiktiga beslut att fatta, till exempel i frågor som gäller klimatutvecklingen och den biologiska mångfalden.

29.4 Kommentarer och utvärdering

29.4.1 Beredningsgruppens kommentarer

En första sammanfattande rapport om den forskning som genomförts inom ramen för samhällsforskningsprogrammet förelåg sent 2009 (SKB 2009e) och redovisades översiktligt i Fud-program 2010. En aktualiserad version, som även publicerades i engelsk översättning, togs fram våren 2011 (SKB 2011f respektive SKB 2011g) inför en internationell konferens som SKB då anordnade för att markera att programmet hade avslutats.

Ansvariga för dessa sammanfattande rapporter var de tre forskare som ingick i beredningsgruppen för genomförandet av forskningsprogrammet, se avsnitt 29.1. Rapporterna innehåller en presentation av samtliga genomförda projekt och de viktigaste resultaten samt kommentarer om samhällsforskningsprogrammets verksamhet och behov av framtida forskning.

Beredningsgruppens kommentarer formulerades kring olika teman och sammanfattas enligt följande.

Programmets karaktär – tillämpad forskning med bredd och djup

Utgångspunkten för SKB:s samhällsforskningsprogram har varit att de kunskaper som programmet ger, ska bidra till ett breddat beslutsunderlag relaterat till de effekter och samhällsproblem som kärnavfallet kan innebära. Programmet har varit ett exempel på sektorsforskning och har därför haft en tydligare fokusering än vad ett program inom exempelvis Vetenskapsrådet eller Riksbanksfonden hade kunnat ha.

Beredningsgruppen ställde frågan om varför statliga forskningsråd och myndigheter inte har skapat större program för att finansiera forskningsprojekt på ett så viktigt område som kärnavfallets sociala och samhälleliga dimensioner. Sådana program skulle, menade gruppen, ha kunnat fungera som komplement till den forskning som SKB har tagit initiativ till.

”Så har emellertid inte skett... Därför har det blivit så att en stor del av den samhällsvetenskapliga och humanistiska kunskap som i dag finns om kärnavfallsfrågan i Sverige har tagits fram inom ramen för SKB:s samhällsforskningsprogram, även om det också finns forskningsprojekt med annan finansiering” (SKB 2011f, s 71).

SKB:s samhällsforskningsprogram har enligt beredningsgruppen inneburit tillämpad forskning med relevans för arbetet med att slutförvara svenskt använt kärnbränsle. Men tillämpad forskning är inte okritisk forskning, underströk gruppen och pekade på att projekt och bidrag till programmets årsböcker innehåller såväl resultat som kan uppfattas som påtagligt kritiska till företeelser, beslut, handlingar och centrala aktörer inom fältet (inkluderat SKB), som inslag vilka ligger i linje med nuvarande inriktning på att utveckla ett slutförvar för använt kärnbränsle.

Programmets kvalitet och effekter

Det har inte saknats goda ansökningar, men rambetingelserna har inneburit att enbart de bästa på de mest centrala forskningsområdena kunnat beviljas medel, underströk beredningsgruppen och återgav följande kriterier som hade gällt vid bedömningar av olika ansökningar:

- Forskningsprojekten ska fokusera på frågor som anknyter till SKB:s uppgift att ta hand om Sveriges använda kärnbränsle. De ska bidra till en höjd kvalitet på de beslutsunderlag som ligger till grund för SKB:s och berörda kommuners framtida beslut i anslutning till etablering av ett slutförvar för använt kärnbränsle. Forskningsprojekten ska också bredda perspektiven på och öka kunskapen om kärnavfallsfrågan.
- Syfte, problemställning, arbetsplan, metod och förväntade resultat ska vara tydligt formulerade. De förväntade resultaten ska vara relevanta både för forskningsområdet och för SKB. Projektens kostnader ska vara rimliga och realistiska. Tillämpad forskning prioriteras. Forskningen ska vara av hög kvalitet och baseras på inomvetenskaplig state-of-the-art.
- Deltagarna i forskningsprojekten ska vara inomvetenskapligt välrenommerade, ha god kunskap om etableringsprocessens bakgrund och innehåll samt vara uppdaterade om dagsläget i SKB:s slutförvarsprogram. Till skillnad från den forskning som bedrivs med medel från offentliga forskningsråd och stiftelser har således de projekt som SKB stöder en mer tydlig karaktär av tillämpad forskning. För att vara relevanta måste de självfallet även vara av hög vetenskaplig kvalitet.

Beredningsgruppens resonemang om effekterna av programmet kan sammanfattas enligt följande:

- Ett kontaktnät mellan alla inblandade forskare vid olika universitet och högskolor har byggts upp, vilket har gett en kumulativ kunskapsuppbyggnad i landet och beredskap för fortsatta insatser inom området.
- Kärnavfallsfrågan har fått ökad synlighet och allt fler forskare kan därför se hur deras kompetenser kan bidra med ny kunskap.

- De 18 projekten inom programmets ram har på olika sätt bidragit med kunskap som är relevant för beslutsfattande i relation till slutförvarsfrågan. Projekten täcker en rad forskningsfält, bland annat med beteendevetenskaplig, samhällsvetenskaplig och ekonomisk, juridisk samt historisk inriktning.
- Programmet har attraherat framstående forskare med stora internationella kontaktnät och egen internationell publicering.
- Projektens kartläggning av samhällsprocesser, attityder och beslutsfattande bör kunna generaliseras till annan verksamhet och utnyttjas i annan forskning, exempelvis miljö- och energiforskning med anknytning till annan industriell verksamhet.

Behov av fortsatt forskning

Beredningsgruppen ställde frågan om programmet redan från starten hade missat någon central dimension eller viktigt tema samt om några nya forskningsområden eller forskningsproblem hade utkristalliserats under projektiden. Något tydligt svar på den frågan gavs inte; gruppen utgick i stället från vart och ett av de fyra forskningsområdena och pekade på ett antal frågeställningar som bedömdes vara av intresse att belysa framöver, antingen med hjälp av satsningar från SKB eller från andra forskningsfinansiärer. I sammanfattning innebar gruppens resonemang följande:

Socioekonomisk påverkan – samhällsekonomiska processer

De två projekt inom området Socioekonomisk påverkan – samhällsekonomiska processer som genomförts har varit hårt fokuserade mot lokala effekter av etableringen av ett slutförvar för använt kärnbränsle när det gäller befolkning och sysselsättning. Även andra frågor kan behöva belysas genom forskningsinsatser, till exempel: Hur ska man – inför en utbyggnad av ett slutförvar som pågår under en relativt lång tid – lokalt planera för att a) utbildningen svarar mot kommande behov, b) den lokala kompetensen för att leverera insatsvaror stärks, c) möjligheter att etablera komplementära verksamheter tas till vara, d) befolkningen i högre grad får sina boendeönskemål tillgodosedda (så att de vill stanna) och e) den lokala kulturen blir mer attraktiv?

Det finns även andra frågor av vidare innebörd. Olika projekt har visat att de huvudsakliga socioekonomiska effekterna hamnar utanför den kommun där etableringen sker. Vilka följder får detta för regionen och för nationen och hur kan denna utveckling påverkas? En fråga av än vidare innebörd utgår från att slutförvarsfrågan resursmässigt kan relateras till landets energiförsörjning i stort och formulerades (SKB 2011f, s 76):

”En möjligen relevant fråga gäller då, om man tillämpar samma kriterier på risk, nytta, kostnader och miljökonsekvenser på alla delar av energiförsörjningssystemet, vilka scenarier skulle då framstå som nationellt och globalt ändamålsenliga?”

Beslutsprocesser

Resultaten av de projekt inom området Beslutsprocesser som genomförts pekade på en stor komplexitet redan i det närliggande arbetet med att hantera väsentliga beslutsdimensioner. Beredningsgruppen menade att en del av problematiken är formell och handlar om uppfattade otydligheter i regelverk, roller och processgång. En annan del är social och berör vilka som deltar och vad som är deras innehållsmässiga bidrag och en tredje del av problematiken är teoretisk och handlar om vilka olika principer och metoder som kan väljas som utgångspunkter. Det krävs därför mer forskning som diskuterar olika utgångspunkter i relation till slutförvarsfrågan, liksom olika sätt att värdera konsekvenser över extremt långa tidsperioder.

Det återstår att, på såväl bredden som djupet, belysa olika slag av existerande formella beslutsstrukturer och beslutsprocesser på nationella, regionala och kommunala nivåer, av myndigheter och andra instanser samt innehållet i och principerna bakom det arbete som utförs. Även frågor som rör relationer mellan nationellt och internationellt beslutsfattande, hur detta regleras och fungerar behöver belysas ytterligare. På individ- och grupp-nivå finns det också anledning att se närmare på vad som bidrar till ställningstaganden, samt hur dessa presenteras och förhandlas inför beslutsfattande.

Opinion och attityder

De projekt som har genomförts inom området Opinion och attityder har gett en aktuell bild av opinionsläget i berörda kommuner och i landet i stort, dock under en relativt kort tid. Beredningsgruppen pekade på behov av att under en längre tid följa attityder hos enskilda individer för att se i vilken utsträckning det sker förändringar, det vill säga att använda så kallad longitudinell individinformation.

Studier med bland annat följande inriktning efterlystes:

- Före-efter-mätningar där man med olika datainsamlingsinstrument systematiskt studerar reaktioner på händelser och beslut.
- En internationell undersökning (i samarbete med en eller flera internationella forskningsorganisationer) om attityder till slutförvaring, kärnkraftsavfall och kärnkraft i olika kärnkraftskommuner i världen.
- Mer ingående studier om hur människor (experter, allmänhet, unga och gamla med flera) fattar olika slags beslut.
- Vilka är ”den tysta majoriteten”, hur resonerar dessa personer och vad innebär det att inte visa engagemang?
- Betydelsen för attitydbildningen av nya eller annorlunda livs- och kommunikationsstilar.
- Sker någon förändring av attityder när processen går från ett nyväckt intresse till ett personligt deltagande i diskussioner eller beslutsprocesser?

Omvärldsförändringar

Beredningsgruppen erinrade om att det vid utlysningarna hade efterlysts forskning om exempelvis globala förändringsprocesser, kärnavfallsfrågan i Europa, utvecklingen på lagstiftningsområdet internationellt och betydelsen av nya hot och risker samt även av ny teknik. De genomförda projekten inom området Omvärldsförändringar har uppmärksammat vissa av dessa frågor. Men samtidigt är detta en föränderlig materia, varför frågeställningarna förblir aktuella.

Förändrade uppfattningar och realiteter kopplade till hot och risker, nya ägandeförhållanden samt genombrott för ny teknik innebär, bedömde beredningsgruppen, nya villkor för vilka beslut som kan fattas eller kommer att fattas kring kärnavfallet. Därför är även forskning om tänkbara och faktiska långsiktiga förändringar i samhällets styrning, inklusive regler och former för deltagande, relevant för såväl människors uppfattningar som för beslutsfattande om hanteringen av kärnavfall. Gruppen pekade särskilt på sådana förändringar som att under den tid som samhällsforskningsprogrammet har existerat hade det skett ett politiskt maktskifte i Sverige, ett större och mer integrerat EU hade vuxit fram, allt bistrare rapporter om framtida miljöhot hade presenterats och, inte minst, hade en svårhanterlig internationell ekonomisk kris drabbat vår del av världen. En tillbakablick på kärnavfallsprogrammet visar att detta hållit sig inom givna ramar, medan omvärlden hade förändrats. Ökad användning av nya former av medie- och informationsteknik, ändrade livsideal och identifikationskällor, upplevd ekonomisk otrygghet, internationalisering av finansväsende och industri, liksom av många yrken och utbildningar såg beredningsgruppen som exempel på omvärldsprocesser som direkt eller indirekt ger återverkningar på upplevelser och beslut. För att fånga dessa olika slags processer i forskning krävs ofta långa tidsserier av datauppgifter och kontinuerliga forskningsinsatser. Sådana insatser låg utanför forskningsprogrammets möjligheter.

29.4.2 Fristående utvärdering

På uppdrag av SKB har en konsult genomfört en utvärdering av SKB:s samhällsforskningsprogram. Rapporten (Söderberg 2012) presenterades vid ett av SKB i september 2012 anordnat seminarium.

Utvärderingen inriktades dels på ett antal övergripande frågor kring syftet med och effekterna av programmet, dels på ett antal frågor kring genomförandet av detta. Uppgiften var inte att företa någon slags överprövning av kvaliteten i de vetenskapliga resultat, som de olika projekten har redovisat. Ansvar för den bedömningen har legat på beredningsgruppen.

Resultatet av utvärderingen har sammanfattats nedan.

Tillkomsten av programmet

SKB:s program för samhällsforskning utformades under perioden 2002–2003 som ett svar på de diskussioner om behovet av samhällsvetenskaplig forskning kring frågeställningar om slutförvaring av använt kärnbränsle, som då pågick i SKB:s omvärld under 15–20 år. Här kan erinras om att Kärnavfallsrådet alltsedan slutet av 1980-talet hade genomfört en rad seminarier med medverkan av forskare och beslutsfattare och då tagit upp frågor om bland annat demokrati, beslutsfattande i komplexa frågor samt, inte minst, etiska aspekter på tänkbara handlingsalternativ. I samband med granskningen av Fud-program 2001 pekade Kärnavfallsrådet (vid den tidpunkten benämnt Kasam – Statens råd för kärnavfallsfrågor) på behovet av en kvalificerad samhällsvetenskaplig forskning inom kärnavfallsområdet. Särskild betydelse för tillkomsten av SKB:s program för samhällsvetenskaplig forskning hade troligen att ledande politiker, i de kommuner där SKB bedrev platsundersökningar, såg ett behov av denna forskning. Om regeringen inte var beredd att avsätta någon form av statliga forskningsmedel för dessa ändamål, återstod för SKB endast alternativet att etablera ett forskningsprogram i egen regi.

Syftet med programmet

SKB har formulerat syftet med sitt program för samhällsforskning i ordalag som både speglar osäkerhet om vilka resultat som forskningen skulle kunna leda fram till och en öppenhet inför sådana resultat. Utgångspunkten var dock att en av företagets huvuduppgifter inom en överblickbar framtid var att presentera ansökningar om tillstånd att anlägga ett slutförvar för använt kärnbränsle på en lämplig plats i Sverige. Det mest väsentliga i beskrivningen av samhällsforskningsprogrammets syfte finns uttryckt i formuleringarna att ”breda perspektivet på kärnbränsleprogrammets samhällsaspekter” samt att ”ge djupare kunskap och bättre underlag för plats- och projektanknutna utredningar och analyser”.

Några av de forskare som har intervjuats inom ramen för utvärderingen framförde synpunkten att SKB:s samhällsvetenskapliga forskningsprogram borde ha haft vidare syften än vad som har gällt.

Ett sådant syfte borde sålunda ha varit att resultaten från denna forskning skulle övervägas ingående inom SKB med utgångspunkten att resultaten skulle kunna föranleda *väsentliga* ändringar i inriktningen av det naturvetenskapliga och tekniska utvecklingsarbete kring hantering och slutförvaring av använt kärnbränsle som SKB bedriver.

Detta resonemang avvisas i utvärderingsrapporten. Enligt denna är det inte realistiskt att förvänta sig att SKB i början av 2000-talet skulle ha formulerat ett syfte för sitt samhällsforskningsprogram av innebörd, att resultaten av detta skulle kunna leda till ett ifrågasättande av inriktningen av det tekniska och naturvetenskapliga utvecklingsarbete som genomförts under det då gångna kvartsseket.

Vid de intervjuer som gjorts inom ramen för utvärderingen hade också framförts att forskning kring samhällsaspekter på kärnavfallshantering även bör avse frågeställningar som mer ligger inom ramen för övergripande energipolitiska ställningstaganden, än inom ramen för SKB:s och dess ägares ansvar för att ta hand om använt kärnbränsle enligt nuvarande lagstiftning. Den slutsats som enligt utvärderingsrapporten ligger närmast till hands är, att om de politiskt ansvariga organen (regering och riksdag) ser behov av fortsatt forskning kring sådana bredare frågeställningar, bör dessa organ ta på sig att i lämplig form initiera och finansiera sådan forskning samt att formulera syftet med den.

Resultat och effekter

Ett kontaktnät mellan alla inblandade forskare vid olika universitet och högskolor har byggts upp, vilket har gett en fortgående och ökad kunskapsuppbyggnad i landet samt en beredskap för fortsatta insatser inom området. Ätminstone vid ett universitet (Linnéuniversitetet) pågår överväganden om på vilket sätt universitetet skulle kunna ägna sig åt fortsatt forskning kring samhällsfrågor med anknytning till kärnavfallshantering.

I övrigt ligger resonemanget i utvärderingen i linje med beredningsgruppens kommentarer när det gäller effekter av programmet (se avsnitt 29.4.1).

Styrkor och svagheter

Styrkan i det nu genomförda programmet för samhällsforskning ligger främst i att det över huvud taget kom till stånd, att det genomfördes målinriktat och i former som säkerställde en hög veten-

skaplig kvalitet på rapporterna från de olika projekten. En svaghet blev att SKB:s engagemang för programmet samtidigt gav upphov till misstänkliggörande av forskningens legitimitet. Men utvärderaren framhåller att detta är en svaghet som ingalunda är speciell i just fallet med SKB:s program för samhällsforskning utan generell för all forskning som finansieras av industriföretag och som rör förhållanden av direkt intresse för företagets verksamhet.

Former för resultatredovisning

SKB har bemödat sig om att få en bred spridning av resultatet från genomförda forskningsprojekt på det samhällsvetenskapliga området, bland annat genom att årligen avrapportera pågående och nyligen avslutade projekt i en populärvetenskaplig form. De medverkande forskarna har uppmuntrats att publicera resultat från sin forskning i den internationella vetenskapliga litteraturen, men forskningsanslagen synes inte ha dimensionerats för att underlätta sådan publicering.

Fortsatt samhällsvetenskaplig forskning på kärnavfallsområdet?

I utvärderingsrapporten framhålls att det av SKB genomförda samhällsvetenskapliga forskningsprogrammet har bidragit till att såväl SKB och Kärnavfallsrådet som enskilda forskare och andra har identifierat ytterligare ett stort antal uppslag för framtida forskning. Oberoende av utfallet av den nu pågående granskningen av SKB:s ansökningar om tillstånd enligt miljöbalken och kärntekniklagen att anlägga ett slutförvar för använt kärnbränsle i Forsmark, kommer det sannolikt att finnas behov av fortsatt forskning kring kärnavfallsfrågor med humanistiska och samhällsvetenskapliga utgångspunkter. Omfattning och former för en fortsättning av SKB:s samhällsforskningsprogram bör övervägas av företagsledningen.

Bör SKB bidra ekonomiskt till fortsatt samhällsvetenskaplig forskning på kärnavfallsområdet?

Utvärderaren menar att det är ett uppenbart samhällsintresse att forskning med humanistiska och samhällsvetenskapliga utgångspunkter kring kärnavfallsfrågorna äger rum. SKB har med sitt samhällsvetenskapliga forskningsprogram 2004–2011 visat insikt om behovet att vidga frågeställningarna utanför de tekniska och naturvetenskapliga ramar som man före 1990-talet arbetade inom. SKB har även visat sig ha förmåga att genomföra ett program med kvalitativt god forskning kring sådana frågeställningar. Det finns inga principiella invändningar mot att SKB även framöver ekonomiskt stöder sådan forskning. Men erfarenheterna av diskussionen kring det samhällsvetenskapliga forskningsprogram som genomförts, bör leda till att andra former av stöd övervägs.

Former för eventuella bidrag från SKB

Om SKB även i framtiden ekonomiskt vill stödja forskning med humanistiska och samhällsvetenskapliga utgångspunkter kring kärnavfallsfrågorna, bör SKB, anförts i utvärderingsrapporten, överväga modeller som bättre motverkar risken att olika intressenter ifrågasätter legitimiteten i den forskning som bedrivs. En sådan modell kan vara att SKB utfäster sig att under en viss tid stödja forskning inom vissa ämnesområden med vissa belopp, men vidtalar en befintlig forskningsfinansiär att hantera utlysningar samt urval av projekt. En annan modell kan innebära att SKB långsiktigt finansierar professorer vid något universitet, som önskar rikta in sig på humanistiska och samhällsvetenskapliga frågeställningar med anknytning till kärnavfallshantering. För- och nackdelar med dessa modeller, jämte ytterligare några, diskuterades vid det tidigare nämnda seminariet där utvärderingen presenterades.

29.5 SKB:s syn på behovet av fortsatt samhällsforskning kring slutförvarsfrågorna

Nödvändigheten av att även andra än rent tekniska och naturvetenskapliga frågeställningar formuleras och undersöks i samband med arbetet med att utforma system för slutlig hantering av kärnkraftens restprodukter – ofta kallat kärnavfall – har stått klart sedan länge. Föregångaren till Kärnavfallsrådet (då mest känd under beteckningen Kasam), liksom även dåvarande Statens Kärnbränslenämnd, efterlyste redan i slutet av 1980-talet studier av dessa frågor med humanistiska och samhällsveten-

skapliga utgångspunkter. Under 1990-talets förstudier inför lokalisering av ett slutförvar för använt kärnbränsle ägnade SKB ett betydande intresse åt samhällsaspekter. Frågorna började också uppmärksammas av enstaka forskare inom humaniora och samhällsvetenskap vid universitet och högskolor. Intressanta studier publicerades i ett antal artiklar i vetenskapliga publikationer och i några större arbeten, men verkar inte ha fått någon spridning utanför kretsen av närmast intresserade forskare. Förslag från Kärnavfallsrådet till regeringen i början av 2000-talet om att ställa särskilda ekonomiska resurser till förfogande för en bredare upplagd forskning kring kärnkraftens avfallsfrågor utifrån humanistiska eller samhällsvetenskapliga utgångspunkter ledde inte till konkreta åtgärder.

SKB:s initiativ i början av 2000-talet att finansiera och i egen regi låta genomföra ett samhällsforskningsprogram var närmast föranlett av, och därför inriktat på, frågeställningar som hänger samman med en av SKB:s huvuduppgifter. Denna uppgift gäller att utveckla och ta i drift säkra system för slutligt omhändertagande av kärnkraftens farligaste restprodukter, det vill säga använt kärnbränsle. Inom ramen för samhällsforskningsprogrammet 2004–2011 har 18 olika forskningsprojekt genomförts, fördelade på fyra forskningsområden, vilka dock i vissa delar glider in i varandra. Dessa områden rubricerades Socioekonomisk påverkan – samhällsekonomiska effekter, Beslutsprocesser, Opinion och attityder – psykosociala processer samt Omvärldsförändringar.

Resultaten har bidragit med kunskap som är relevant för slutförvarsfrågan och spreds särskilt till intresserade medborgare i närmast berörda kommuner. Det kontaktnät som byggdes upp mellan inblandade forskare vid olika universitet och högskolor gav en kumulativ kunskapsupbyggnad och beredskap för fortsatta insatser inom området. En annan effekt är att kärnavfallsfrågan har fått ökad synlighet. Fler forskare kan därför se hur deras kompetenser kan bidra med ny kunskap. Forskare som ansvarat för eller deltagit i projekten har uppmuntrats att utnyttja resultaten för internationell publicering.

Både Kärnavfallsrådet och Strålsäkerhetsmyndigheten har i samband med sina olika granskningar av Fud-program 2007 och Fud-program 2010 uttryckt uppskattning av samhällsforskningsprogrammet. Viss kritik har dock förekommit, närmast av innebörd att programmet borde ha rymt studier av ytterligare problemställningar utöver de som har tagits upp. Samtidigt har både Kärnavfallsrådet och Strålsäkerhetsmyndigheten understrukit att forskning med samhällsvetenskapliga och humanistiska utgångspunkter kring kärnavfallsfrågorna också bör stödjas ekonomiskt av andra än SKB. I granskningsyttrandet över Fud-program 2010 uppmanade Kärnavfallsrådet regeringen att utreda formerna för den samhällsvetenskapliga och humanistiska fristående kärnavfallsforskningen och att under kommande decennier avsätta särskilda medel för sådan forskning.

Det kan konstateras att resultat från SKB:s samhällsforskningsprogram också har intresse för SKB:s arbete med att slutligt ta hand om det låg- och medelaktiva kärnavfallet. Forskningsprojektens kartläggning av samhällsprocesser, attityder och beslutsfattande kan i många fall generaliseras till den verksamheten och bör även kunna utnyttjas i annan forskning, exempelvis miljö- och energiforskning med anknytning till olika industriella verksamheter.

De skäl som i början av 2000-talet föranledde SKB att initiera ett samhällsforskningsprogram i den form som då gällde har inte längre samma styrka. Programmet har visserligen bidragit till en kunskapsutveckling som sannolikt utan detta initiativ inte hade kommit till stånd. Samhällsvetare och humanister har i ökad utsträckning börjat intressera sig för frågorna. Insikten om behovet och värdet av denna forskning har blivit spridd inom forskarsamhället, liksom bland allmänheten och politiska beslutsfattare. SKB:s uppfattning är att fortsatta forskningsinsatser på detta område framöver i första hand bör finansieras på sätt som är gängse inom universitet och högskolor, det vill säga genom att olika forskare ansöker om medel hos olika forskningsfinansierande organ, exempelvis statliga eller privata forskningsråd eller motsvarande.

SKB avser därför inte att för närvarande initiera ett nytt forskningsprogram av den typ som nu har avslutats. En orsak till detta är det faktum att handläggningen av SKB:s ansökningar enligt miljöbalken och kärntekniklagen om tillstånd att anlägga bland annat ett slutförvar för använt kärnbränsle i Forsmark pågår och inte bedöms vara avslutad förrän tidigast 2015. SKB är emellertid berett att finansiera forskningsprojekt med samhällsvetenskaplig inriktning inom områden som bedöms som viktiga för SKB:s verksamhet, särskilt i det fortsatta arbetet i Oskarshamn och Östhammars kommuner.

30 Informationsbevarande över generationer

30.1 Slutsatser i granskningen av Fud-program 2010

Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) saknade vid granskningen av Fud-program 2010 en redovisning av SKB:s arbete kring informationsbevarande kopplat till slutförvaring av använt kärnbränsle, men konstaterade samtidigt att SKB tidigare har utfört ett arbete inom området.

Sedan Fud-program 2010 har SKB startat ett arbete om bevarande av information och kunskap om slutförvaret för använt kärnbränsle.

30.2 Bakgrund och tidigare arbete

SKB:s metod för att slutförvara det använda kärnbränslet innebär att det inte behövs några aktiva åtgärder, i form av till exempel underhåll eller förbättringar, för att förvaret ska förbli säkert. Slutförvarets existens ska inte utgöra någon belastning för kommande generationer. Kunskapen och informationen om slutförvaret för använt kärnbränsle bör emellertid föras vidare till dessa, bland annat för att undvika oavsiktligt intrång.

Redan år 1990 genomfördes inom ramen för Nordisk kärnsäkerhetsforskning (NKS), projektet NKS CAN-1.3 – Conservation and retrieval of nuclear information (Jensen 1993). Syftet med CAN-projektet var att svara på följande frågor:

- Vilken typ av information ska bevaras till framtida generationer?
- I vilken form ska informationen förvaras?
- Vilken kvalitet ska informationen ha gällande typ och form?
- Hur ska informationen kunna komma åt även efter mycket lång tid?

CAN-projektet fick mycket uppmärksamhet i internationella kretsar. År 2003 anordnade IAEA en internationell konferens i Rom för att behandla frågor om bevarande av kunskap och information över lång tid och där redovisades resultaten från bland annat CAN-projektet.

År 2007 lät SKB sammanställa information om vad som gjorts inom området i Sverige och i några utvalda länder (Bowen-Schrire et al. 2007). År 2008 presenterades centrala aspekter vid informationsbevarande och risker som kan leda till att viktig information förloras. Utifrån detta beskrevs även ett förslag till handlingsplan för SKB (Bowen-Schrire et al. 2008).

Frågan om hur informationsbevarandet kan ske och vem som har ansvaret, har bland annat kommit upp i samråden för Clink och Kärnbränsleförvaret och i samband med ansökningarna om tillstånd enligt miljöbalken och kärntekniklagen för dessa anläggningar. Den har uppmärksammats i media och det har också framkommit önskemål från myndigheterna, speciellt dåvarande Statens strålskyddsinstitut i samråden, om att SKB ska presentera ett förslag om en handlingsplan för hur informationen och kunskapen kan bevaras under mycket lång tid.

30.3 Former för överföring av information

Det finns två grundläggande principer för hur information kan föras vidare till framtida generationer – successiv informationsöverföring och information som är riktad direkt till en avlägsen framtid. Den successiva informationsöverföringen innebär att människor överför informationen till varandra, till exempel genom att upprätta arkiv som efterkommande kan ta del av. För överföring av information direkt till en avlägsen framtid kan så kallade markörer användas, genom att ett slutförvar markeras rent fysiskt i naturen på ett sätt som avses bli beständigt under en mycket lång framtid. Markören förutsätts överföra ett budskap som innebär någon form av varning. De länder som arbetar med frågan om informationsbevarande över lång tid, är alla inriktade på successiv överföring. Några länder arbetar även med överföring direkt till en avlägsen framtid.

Den framtida målgruppen för mottagandet av kunskapen och informationen kan komma att variera. Det skulle till exempel kunna vara nästa generation handläggare av nya anläggningsprojekt, myndigheter, politiker, prospekterare, forskare eller allmänheten. Olika målgrupper har olika behov av information och kunskap.

En viktig intressent i frågan om bevarande av information och data är SSM. Sverige har anslutit sig till icke-spridningsfördraget och har genom det åtagit sig att underställa hela sitt kärnenergiprogram – inklusive slutförvar – internationell kontroll. Enligt avtal med FN:s kärnenergiorgan, IAEA, ska Sverige ha ett system för kärnämneskontroll som möjliggör för IAEA att utföra den internationella kontrollen. I Sverige utförs kärnämneskontrollen av SSM, som utfärdar föreskrifter om vilken information som ska bevaras och hur den ska bevaras. Frågan om hur kärnämneskontrollen för ett slutförvar för använt kärnbränsle ska gå till och vilken information som ska bevaras, måste först hanteras av de internationella organ som utför kontrollen, varefter det är SSM:s ansvar att omsätta internationella överenskommelser till svenska bestämmelser.

Oavsett framtida mottagare är det viktigt att informationen är lättillgänglig och lättförståelig. Den måste kunna läsas fysiskt, men även tolkas förståelsemässigt. Att bevara kunskapen och informationen om Kärnbränsleförvaret långt in i framtiden ställer alltså krav utöver enbart arkivering.

30.4 Pågående arbete

De viktiga frågorna om informationsbevarande behöver lösas först i samband med att slutförvaret för använt kärnbränsle ska förslutas, vilket beräknas ske tidigast omkring 2085. Det är inte möjligt, varken för SKB eller berörda myndigheter, att i dag ta ställning till hur man ska gå till väga så långt fram i tiden. Det övergripande målet med SKB:s pågående arbete är därför nu att hitta arbetsätt och kanaler för att fortsatt hålla frågan om hur man kan bevara information och kunskap om ett slutförvar för radioaktivt avfall efter förslutning aktuell och levande. Dessutom behöver det analyseras i vilken utsträckning det är nödvändigt att på lång sikt bevara data som framkommer under arbetet med att dels utveckla metoden för slutförvaring av använt kärnbränsle, dels bygga slutförvaret.

SKB:s pågående arbete består av olika delar, dels egna forskningsuppdrag, dels deltagande i ett OECD/NEA-projekt och samarbete med Andra, SKB:s motsvarighet i Frankrike. Målen med de egna forskningsuppdragen är att vidga kunskapen om hur man kan bevara information och kunskap under lång tid. Detta görs bland annat genom att se hur vi har fått den kunskap vi har i dag om historiska och mycket gamla företeelser samt hur språk utvecklas och förändras med tiden.

I början av 2012 initierade SKB ett första forskningsuppdrag om informationsbevarande, *One hundred thousand years back and forth*, på Institutionen för kulturvetenskaper, Linnéuniversitetet i Kalmar. Forskningen berör tre områden och innefattar bland annat följande frågeställningar:

- Tid och det avlägsna förflutna. Hur kan arkeologisk förståelse av människans utveckling bidra till förståelse för både bevarande och kommunikation hundra tusen år in i framtiden? Finns det några verkliga mänskliga kontinuiteter över så lång tid?
- Att minnas, lära och förstå historia inom ramarna för det historiska medvetandet och det kollektiva minnet. Vad kan vi lära från befintliga debatter om historiens didaktik och pedagogik för kommunikation med generationer på lång sikt? Vad kan en diskussion om historiskt medvetande, olika tidsbegrepp och kulturellt/kollektivt minne bidra med till beslutsfattande om strategier för informationsbevarande långt in i framtiden efter förslutning av ett slutförvar för använt kärnbränsle?
- Kärnavfall, kulturarv och framtid. Vad vet man inom kulturarvssektorn (eller kan anta) om framtiden? Vad vet man inom kärnavfallssektorn (eller kan anta) om framtiden? Hur är denna kunskap i respektive fall översatt till uppdrag, metoder för hantering, förvaltning och riktlinjer och hur matchar de varandra?

Uppdraget till Linnéuniversitet planeras att pågå i tre år, det vill säga till och med år 2014. Det huvudsakliga resultatet kommer att vara reflektioner över frågeställningarna i vetenskapliga artiklar. En annan viktig effekt av arbetet är att frågan om hur man kan bevara information över långa tider sprids till andra kompetensområden och andra länder via forskarnas deltagande i internationella konferenser inom andra områden än hanteringen av radioaktivt avfall.

SKB har initierat ytterligare ett forskningsprojekt inom området informationsbevarande. Det avses starta på Centrum för teologi och religionsvetenskap vid Lunds universitet i slutet av år 2013. Projektet innefattar frågeställningar kring språk. Hur ska man tänka och arbeta för att underlätta för framtiden att förstå det språk vi använder för efterlämnad information? Vad behövs för att rekonstruera ett utdött språk? Hur beskriver man en teknik för att den ska förstås, även när den slutat användas och fallit i glömska?

Uppdraget är på ett år och innebär att koppla ihop frågeställningarna ovan med frågan om att bevara informationen om Kärnbränsleförvaret och publicera artiklar i vetenskapliga tidskrifter. Även för detta uppdrag blir en effekt en spridning av frågan till nya forskningsområden genom att artiklarna lämnas till tidskrifter utanför SKB:s tekniska och naturvetenskapliga forskningsområden.

I OECD-NEA-projektet Records, Knowledge and Memory (RK&M) deltar tolv länder med insatser bland annat inom följande områden:

- Bedömning av olika tekniska och administrativa möjligheter för överföring av information från en generation till en annan samt direkt från en generation till en avlägsen framtid.
- Utvärdering av åtgärder för att mildra och anpassa potentiella informationsförluster.
- Analys av tekniska och organisatoriska perspektiv för informationsbevarande, mot bakgrund av tidigare samhällslig utveckling.
- Initiativ för internationella harmoniserade metoder för att undvika onödiga skillnader mellan olika länders agerande.
- Analys av de ekonomiska utmaningarna för långsiktigt informationsbevarande och förslag till hur man tar med dem i framtida program.
- Upprättandet av effektiva former för alla berörda parter att arbeta tillsammans både nationellt och internationellt.

Projektet startade i september 2011 och ska pågå till och med 2014 (OECD/NEA 2011). Den huvudsakliga, konkreta slutprodukten planeras bli ett menydrivet dokument som hjälper att identifiera delarna i en strategisk handlingsplan för att bevara data, kunskap och minnet om ett slutförvar för radioaktivt avfall. Dokumentet planeras bli i formen av en elektronisk databas.

SKB har vidare ett samarbete med sin franska motsvarighet, Andra, om informationsbevarande. Andra har ett omfattande program för de närmaste åren, till exempel beträffande kulturarv och sociala frågor:

- Allmänhetens uppfattning om långa tidsskalor (etik, filosofi, sociologi etc).
- Arkeologi i landskapet.
- Bevarandet av historiska platser och industriellt minne.
- Institutionella organisationers kontinuitet.
- Konsekvenserna av sociala haverier (krig, naturkatastrofer etc).
- Minne och historien om vetenskapens evolution.

Referenser

Publikationer utgivna av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) kan hämtas på www.skb.se/publikationer.

Referenser till SKB:s opublicerade dokument finns samlade i slutet av referenslistan.

Opublished dokument lämnas ut vid förfrågan till dokument@skb.se.

Aalto P, Aaltonen I, Ahokas H, J Andersson, Hakala M, Hellä P, Hudson J, Johansson E, Kemppainen K, Koskinen L, Laaksoharju M, Lahti M, Lindgren S, Mustonen A, K Pedersen, Pitkänen P, Poteri A, Snellman M, Ylä-Mella M, 2009. Programme for repository host rock characterisation in the ONKALO (ReRoC). Posiva Working Report 2009-31, Posiva Oy, Finland.

Aaltonen I, Douglas B, Claesson Liljedahl L, Frape S, Henkemans E, Hobbs M, Klint K E, Lehtinen A, Lintinen P, Ruskeeniemi T, 2010. The Greenland Analogue Project, sub-project C. 2008 field and data report. Posiva Working Report 2010-62, Posiva Oy, Finland.

Ahlström P-E (red), Blomgren J, Ekberg C, Englund S, Fermvik A, Liljenzin J O, Retegan T, Skarnermark G, Eriksson M, Seltborg P, Wallenius J, Westlén D, 2007. Partitioning and transmutation. Current developments – 2007. A report from the Swedish reference group for P&T-research. SKB TR-07-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Albinsson Y, Ödegaard-Jensen A, Oversby V M, Werme L O, 2003. Leaching of spent fuel under anaerobic and reducing conditions. I Finch R J, Bullen D B (red). Scientific basis for nuclear waste management XXVI. Warrendale, PA: Materials Research Society. (Materials Research Society Symposium Proceedings 757), 407–413.

Alexander W R, Milodowski A E, Pitty A F (red), 2011. Cyprus Natural Analogue Project (CNAP) Phase III final report. Posiva Working Report 2011-77, Posiva Oy, Finland.

Amme M, Pehrman R, Deutsch R, Roth O, Jonsson M, 2012. Combined effects of Fe(II) and oxidizing radiolysis products on UO₂ and PuO₂ dissolution in a system containing solid UO₂ and PuO₂. Journal of Nuclear Materials 430, 1–5.

Andersson E (red), 2010. The limnic ecosystems at Forsmark and Laxemar-Simpevarp. SKB TR-10-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Andersson E, Aquilonius K, Sivars Becker L, Borgiel M, 2011. Site investigation SFR. Vegetation in streams in the Forsmark area. SKB P-11-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Andersson J C, 2007. Äspö pillar stability experiment: rock mass response to coupled mechanical thermal loading. Doktorsavh. Kungliga Tekniska högskolan.

Andersson J, Skagius K, Winberg A, Lindborg T, Ström A, 2013. Site-descriptive modelling for a final repository for spent nuclear fuel in Sweden. Environmental Earth Sciences 69, 1045–1060.

Andersson L, Sandén T, 2012. Optimization of backfill pellet properties. ÅSKAR DP2. Laboratory tests. SKB R-12-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Andersson M, Ervanne H, Glaus M A, Holgersson S, Karttunen P, Laine H, Lothenbach B, Puigdomenech I, Schwyn B, Snellman M, Ueda H, Vuorio M, Wieland E, Yamamoto T, 2008. Development of methodology for evaluation of long-term safety aspects of organic cement paste components. Posiva Working Report 2008-28, Posiva Oy, Finland.

Andersson-Skog L, 2007. Växtkraft av kärnkraft? Kärnkraftetableringens socioekonomiska effekter i Oskarshamn och Östhammar 1960–2000. SKB R-07-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Andersson-Östling H, Sandström R, 2011. Effect of loading rate on creep of phosphorus doped copper. SKB TR-11-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.

André M, 2009. New methods for the determination of sorption capacities and sorption-related properties of intact rock. Doktorsavh. Skolan för kemivetenskap, Kungliga Tekniska högskolan.

Andrén M, Strandberg U (red), 2005. Kärnavfallets politiska utmaningar. Hedemora: Gidlund.

Anshelm J, 2006. Från energiresurs till kvittblivningsproblem. Frågan om kärnavfallets hantering i det offentliga samtalet i Sverige, 1950–2002. SKB R-06-113, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Apted M J, Arthur R, Bennett D, Savage D, Sällfors G, Wennerström H, 2010. Buffer erosion: an overview of concepts and potential safety consequences. SSM Report 2010:31, Strålsäkerhetsmyndigheten.

Aquilonius K (red), 2010. The marine ecosystems at Forsmark and Laxemar-Simpevarp. SR-Site Biosphere. SKB TR-10-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Aquilonius K, Qvarfordt S, Borgiel M, 2011.** Validation of the marine vegetation model in Forsmark. SFR-Site Forsmark. SKB P-11-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ari-Lahti E, Lehtikuusi T, Saario T, Varis P, 2010.** Sulphide induced stress corrosion cracking of copper – Intermediate Report 3. Research Report VTT-R-10541-10, VTT, Finland.
- Ari-Lahti E, Carpén L, Lehtikuusi T, Olin M, Saario T, Varis P, 2011a.** Sulphide induced stress corrosion cracking of copper – Final report. Research Report VTT-R-00467-11, VTT, Finland.
- Ari-Lahti E, Lehtikuusi T, Olin M, Saario T, Varis P, 2011b.** Evidence for internal diffusion of sulphide from groundwater into grain boundaries ahead of crack tip in Cu OFP copper. *Corrosion Engineering, Science and Technology* 46, 134–137.
- Ari-Lahti E, Mattilla M, Lehtikuusi T, Saario T, Varis P, 2012.** Sulphide-induced embrittlement of Cu OFP – Intermediate report 2. Research Report VTT-R-00291-12, VTT, Finland.
- Arnold B W, Brady P V, Bauer S J, Herrick C, Pye S, Finger J, 2011.** Reference design and operations for deep borehole disposal of high level radioactive waste. SAND2011-6749, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico.
- Avila R, 2006.** Model of the long-term transfer of radionuclides in forests. SKB TR-06-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Avila R, Ekström P-A, Åstrand P-G, 2010.** Landscape dose conversion factors used in the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Avila R, Kautsky U, Ekström P-A, Åstrand P-G, Saetre P, 2013.** Model of the long-term transport and accumulation of radionuclides in future landscapes. *Ambio* 42, 497–505.
- Babaahmadi A, 2013.** Development of a method for accelerated ageing of cementitious materials used in repositories for nuclear waste. Licentiatavh. Chalmers tekniska högskola.
- Backers T, 2005.** Fracture toughness determination and micromechanics of rock under mode I and mode II loading. Scientific Technical Report STR 05/05, GeoForschungsZentrum, Potsdam.
- Backers T, Stephansson O, 2008.** Modelling of fracture initiation, propagation and creep of a KBS-3V and KBS-3H repository in sparsely fractured rock with application to the design at Forsmark candidate site. SKI Report 2008:25, Statens kärnkraftinspektion.
- Backers T, Stephansson O, 2012.** ISRM suggested method for the determination of mode II fracture toughness. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 45, 1011–1022.
- Backman K, Hallstadius L, Rönnberg G, 2010.** Westinghouse advanced doped pellet – characteristics and irradiation behaviour. I Advanced fuel pellet materials and fuel rod design for water cooled reactors: proceedings of a Technical Committee meeting held in Villigen, 23–26 november 2009. IAEA-TECDOC-1654, International Atomic Energy Agency, 117–126.
- Bartholomew I, Nienow P, Mair D, Hubbard A, King M A, Sole A, 2010.** Seasonal evolution of subglacial drainage and acceleration in a Greenland outlet glacier. *Nature Geoscience* 3, 408–411.
- Bath A, 2012.** Groundwater chemistry in SKB's safety assessment SR-Site: initial review. Technical Note 2012:32, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- Becker R, Hermansson H-P, 2011.** Evolution of hydrogen by copper in ultrapure water without dissolved oxygen. Report 2011:34, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- Bengtsson A, Chukharkina A, Eriksson L, Hallbeck B, Hallbeck L, Johansson J, Johansson L, Pedersen K, 2013.** Development of a method for the study of H₂ gas emission in sealed compartments containing canister copper immersed in O₂-free water. SKB TR-13-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Beresford N A, Brown J, Coplestone D, Garnier-Laplace J, Howard B, Larsson C M, Oughton D, Pröhl G, Zinger I (red), 2007.** D-ERICA: An integrated approach to the assessment and management of environmental risk from ionising radiation. Description of purpose, methodology and application. ERICA project, contract number FI6R-CT-2004-508847, European Commission.
- Berger A, Loutre M F, 2002.** An exceptionally long interglacial ahead? *Science* 297, 1287–1288.
- Berggren M, Ström L, Laudon H, Karlsson J, Jonsson A, Giesler R, Bergström A K, Jansson M, 2010.** Lake secondary production fueled by rapid transfer of low molecular weight organic carbon from terrestrial sources to aquatic consumers. *Ecology Letters* 13, 870–880.
- Berglund S, Bosson E, Lindborg T, Sassner M, 2011.** Solute transport from geosphere to biosphere: modeling results from the Forsmark site, Sweden. *Radioprotection* 46, S539–S545.
- Berglund S, Bosson E, Sassner M, 2013a.** From site data to safety assessment: analysis of present and future hydrological conditions at a coastal site in Sweden. *Ambio* 42, 425–434.

- Berglund S, Bosson E, Selroos J-O, Sassner M, 2013b.** Identification and characterization of potential discharge areas for radionuclide transport by groundwater from a nuclear waste repository in Sweden. *Ambio* 42, 435–446.
- Betongföreningen, 2007.** Vägledning för livslängdsdimensionering av betongkonstruktioner. Stockholm: Svenska betongföreningen. (Betongrapport 12)
- Betova I, Bojinov M, Lilja C, 2013a.** Long-term interaction of copper with a deoxygenated neutral aqueous solution. *Journal of Electrochemical Society* 160, C49–C58.
- Betova I, Bojinov M, Lilja C, 2013b.** Influence of chloride on the long-term interaction of copper with deoxygenated neutral aqueous solutions. *Corrosion Science* 76, 192–205.
- Bhaskaran G, Carcea A, Ulaganathan J, Wang S, Huang Y, Newman R C, 2013.** Fundamental aspects of stress corrosion cracking of copper relevant to the Swedish deep geologic repository concept. SKB TR-12-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bienvenu P, Cassette P, Androletti G, Bé M-M, Comte J, Lépy M-C, 2007.** A new determination of ⁷⁹Se half-life. *Applied Radiation and Isotopes* 65, 355–364.
- Birgersson M, Goudarzi R, 2013.** Studies of vapor transport from buffer to tunnel backfill (sauna effects). SKB R-13-42, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Birgersson M, Karnland O, Nilsson U, 2010.** Freezing of bentonite. Experimental studies and theoretical considerations. SKB TR-10-40, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Björkbacka Å, Hosseinpour S, Leygraf C, Jonsson M, 2012.** Radiation induced corrosion of copper in anoxic aqueous solution. *Electrochemical and Solid-State Letters* 15, C5–C7.
- Björkbacka Å, Hosseinpour S, Johnson M, Leygraf C, Jonsson M, 2013.** Radiation induced corrosion of copper for spent nuclear fuel storage. *Radiation Physics and Chemistry*. doi: 10.1016/j.radphyschem.2013.06.033
- Björkenstam E, 1997.** Utveckling av SFR-bruket. Vattenfall Rapport UC 97:4Ö, Vattenfall Utveckling AB, Betongteknik, Älvkarleby.
- Blackwood D J, Gould L J, Naish C C, Porter F M, Rance A P, Sharland S M, Smart N R, Thomas M I, Yates T, 2002.** The localised corrosion of carbon steel and stainless steel in simulated repository environments. AEAT/ERRA-0318, United Kingdom Nirex Limited.
- Blomgren J (red), Karlsson F, Pomp S, Aneheim E, Ekberg C, Fermvik A, Skarnemark G, Wallenius J, Zakova J, Grenthe I, Szabó Z, 2010.** Partitioning and transmutation. Current developments – 2010. A report from the Swedish reference group for P&T research. SKB TR-10-35, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bojinov M, Betova I, Lilja C, 2010.** A mechanism of interaction of copper with a deoxygenated neutral aqueous solution. *Corrosion Science* 52, 2917–2927.
- Booth A D, Clark R A, Kulesa B, Murray T, Carter J, Doyle S, Hubbard A, 2012.** Thin-layer effects in glaciological seismic amplitude-versus-angle (AVA) analysis: implications for characterising a subglacial till unit, Russell Glacier, West Greenland. *The Cryosphere* 6, 909–922.
- Bosson E, Sassner M, Sabel U, Gustafsson L-G, 2010.** Modelling of present and future hydrology and solute transport at Forsmark. SR-Site Biosphere. SKB R-10-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bosson E, Sabel U, Gustafsson L-G, Sassner M, Destouni G, 2012a.** Influences of shifts in climate, landscape, and permafrost on terrestrial hydrology. *Journal of Geophysical Research* 117, D05120. doi:10.1029/2011JD016429
- Bosson E, Selroos J-O, Stigsson M, Gustafsson L-G, Destouni G, 2012b.** Exchange and pathways of deep and shallow groundwater in different climate and permafrost conditions using the Forsmark site, Sweden, as an example catchment. *Hydrogeology Journal* 21, 225–237.
- Bowen-Schrire M, Jander H, Waniewska K, 2007.** Kunskapsbevarande för framtiden – Fas 1. SKB P-07-220, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bowen-Schrire M, Eckerhall D, Jander H, Waniewska K, 2008.** Bevarande av information om slutförvar av använt kärnbränsle – förslag till handlingsplan. SKB P-08-76, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bradbury M H, Van Loon, 1997.** Cementitious near-field sorption data bases for performance assessment of a L/ILW repository in a Palfris Marl host rock. PSI Bericht 98-01, Paul Scherrer Institut, Schweiz.
- Bradshaw C, Kautsky U, Kumblad L, 2012.** Ecological stoichiometry and multi-element transfer in a coastal ecosystem. *Ecosystems* 15, 591–603.
- Brady P V, Arnold B W, Freeze G A, Swift P N, Bauer S J, Kanney J L, Rechar R P, Stein J S, 2009.** Deep borehole disposal of high-level radioactive waste. SAND2009-4401, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico.

- Brandefelt J, Otto-Bliesner B L, 2009.** Equilibration and variability in a Last Glacial Maximum climate simulation with CCSM3. *Geophysical Research Letters* 36, L19712. doi:10.1029/2009GL040364
- Brandefelt J, Kjellström E, Näslund J-O, Strandberg G, Voelker A H L, Wohlfarth B, 2011.** A coupled climate model simulation of Marine Isotope Stage 3 stadial climate. *Climate of the Past* 7, 649–670.
- Brandefelt J, Näslund J-O, Zhang Q, Hartikainen J, 2013.** The potential for cold climate conditions and permafrost in Forsmark in the next 60,000 years. SKB TR-13-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Brinkerhoff D J, Meierbachtol T W, Johnson J V, Harper J T, 2011.** Sensitivity of the frozen/melted basal boundary to perturbations of basal traction and geothermal heat flux: Isunnguata Sermia, western Greenland. *Annals of Glaciology* 52, 43–50.
- Brindley G W, Brown G (red), 1980.** Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. London: Mineralogical Society. (Monograph/Mineralogical Society 5)
- Brown P, Curti E, Grambow B, Ekberg C, 2005.** Chemical thermodynamics. Vol 8, Chemical thermodynamics of Zirconium. Amsterdam: Elsevier.
- Brown J E, Alfonso B, Avila R, Beresford N A, Copplestone D, Pröhl G, Ulanovsky A, 2008.** The ERICA tool. *Journal of Environmental Radioactivity* 99, 1371–1383.
- Brun C, 2008.** Major and trace elements in boreal forests: litter decomposition, soil-plant chemistry and aspects of pollution. Doktorsavh. Högskolan i Kalmar.
- Brydsten L, 2006.** A model for landscape development in terms of shoreline displacement, sediment dynamics, lake formation, and lake choke-up processes. SKB TR-06-40, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Brydsten L, 2009.** Sediment dynamics in the coastal areas of Forsmark and Laxemar during an interglacial. SKB TR-09-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Brydsten L, Strömgren M, 2010.** A coupled regolith-lake development model applied to the Forsmark site. SKB TR-10-56, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Brydsten L, Engqvist A, Näslund J-O, Lindborg T, 2009.** Expected extreme sea levels at Forsmark and Laxemar-Simpevarp up until year 2100. SKB TR-09-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bäckblom G, 2008.** Excavation damage and disturbance in crystalline rock – results from experiments and analyses. SKB TR-08-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bödvarsson R, 2012.** Swedish National Seismic Network (SNSN). A short report on recorded earthquakes during the fourth quarter of the year 2011. SKB P-12-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Börgesson L, Hernelind J, 2010.** Earthquake induced rock shear through a deposition hole. Modelling of three model tests scaled 1:10. Verification of the bentonite material model and the calculation technique. SKB TR-10-33, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Börgesson L, Gunnarsson D, Johannesson L-E, Sandén T, 2002.** Äspö Hard Rock Laboratory. Prototype Repository. Installation of buffer, canisters, backfill and instruments in Section 1. SKB IPR-02-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Börgesson L, Dueck A, Johannesson L-E, 2010.** Material model for shear of the buffer – evaluation of laboratory test results. SKB TR-10-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Carlsson T, 2008.** Interactions between copper corrosion products and MX-80 bentonite. Posiva Working Report 2008-46, Posiva Oy, Finland.
- CEA, 2012.** Report on the sustainable radioactive waste management. CEA, Frankrike. Tillgänglig: <http://www.cea.fr/content/download/112863/2133449/file/CEA-report-sustainable-radioactive-waste-management.pdf>
- Cederlund G, Broman E, 2010a.** Monitoring Forsmark. Älgstammens åldersammansättning, reproduktion och hornutveckling i Forsmark jaktåret 2009. SKB P-10-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Cederlund G, Broman E, 2010b.** Monitoring Forsmark. Älgstammens åldersammansättning, reproduktion och hornutveckling i Hållnäs jaktåret 2009. SKB P-10-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Cederlund G, Broman E, 2011a.** Monitoring Forsmark. Älgstammens åldersammansättning, reproduktion och hornutveckling i Forsmark. SKB P-11-36, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Cederlund G, Broman E, 2011b.** Monitoring Forsmark. Älgstammens åldersammansättning, reproduktion och hornutveckling i Hållnäs. SKB P-11-37, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Cederlund G, Broman E, Bergström B, 2012a.** Monitoring Forsmark. Älgstammens åldersammansättning, reproduktion och hornutveckling i Forsmark. SKB P-12-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Cederlund G, Broman E, Bergström B, 2012b.** Monitoring Forsmark. Älgstammens åldersammansättning, reproduktion och hornutveckling i Hållnäs. SKB P-12-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Cederqvist L, 2011.** Friction stir welding of copper canisters using power and temperature control. Doktorsavh. Lunds universitet.
- Charpentiera D, Devineau K, Mosser-Ruck R, Cathelineau M, Villiéras F, 2006.** Bentonite–iron interactions under alkaline condition: an experimental approach. *Applied Clay Science* 32, 1–13.
- Chen J, Qin Z, Shoesmith D W, 2010.** Kinetics of corrosion film growth on copper in neutral chloride solutions containing small concentrations of sulfide. *Journal of the Electrochemical Society* 157, C338–C345.
- Chen J, Qin Z, Shoesmith D W, 2011a.** Rate controlling reactions for copper corrosion in anearobic aqueous sulphide solutions. *Corrosion Engineering, Science and Technology* 46, 138–141.
- Chen J, Qin Z, Shoesmith D W, 2011b.** Long-term corrosion of copper in a dilute anaerobic sulfide solution. *Electrochimica Acta* 56, 7854–7861.
- Christensen H, 1998.** Calculations simulating spent-fuel leaching experiments. *Nuclear Technology* 124, 165–174.
- Christiansson R, Janson T, 2003.** A test of different stress measurement methods in two orthogonal bore holes in Äspö Hard Rock Laboratory (HRL), Sweden. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 40, 1161–1172.
- Christiansson R, Ericsson L O, Gustafson G, 2009.** Hydraulic characterisation and conceptual modelling of the Excavation Disturbed Zone (EDZ). I Proceedings of the ISRM-Sponsored international symposium on rock mechanics: “Rock characterisation, modelling and engineering design methods” (SINOROCK 2009) held at the University of Hong Kong, China, 19–22 May 2009.
- Christiansson R, Hakala M, Kempainen K, Siren T, Martin C D, 2012.** Findings from large scale in-situ experiments to establish the initiation of spalling. I Proceedings of International Symposium EUROCK 2012 – Rock engineering and technology for sustainable underground construction, Stockholm, 28–30 May 2012. Stockholm: BeFo, Lissabon: International Society for Rock Mechanics.
- Clarhäll A, 2011.** SKB studies of the periglacial environment – report from field studies in Kangerlussuaq, Greenland 2008 and 2010. SKB P-11-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Collin M, Börgesson L, 2001.** Äspö Hard Rock Laboratory. Prototype repository. Instrumentation of buffer and backfill for measuring THM processes. SKB IPR-02-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Corell H, 2012.** Applications of ocean transport modelling. Doktorsavh. Stockholms universitet, Meteorologiska institutionen.
- Corell H, Döös K, 2013.** Difference in particle transport between two coastal areas in the Baltic Sea investigated with high-resolution trajectory modeling. *Ambio* 42, 455–463.
- Corkhill C L, Bailey D J, Thornber S M, Stennett M C, Hyatt N C, 2013.** Reducing the uncertainty of nuclear fuel dissolution: an investigation of UO₂ analogue CeO₂. I Scientific basis for nuclear waste management XXXVI. Warrendale, PA: Materials Research Society. (Materials Research Society Symposium Proceedings 1518). doi:10.1557/opl.2013.90
- Costin D T, Mesbah A, Clavier N, Dacheux N, Poinssot C, Szenknekt S, Ravaux J, 2011.** How to explain the difficulties in the coffinite synthesis from the study of uranothorite? *Inorganic Chemistry* 50, 11117–11126.
- Costin D T, Mesbah A, Clavier N, Szenknekt S, Dacheux N, Poinssot C, Ravaux J, Brau H P, 2012.** Preparation and characterization of synthetic Th_{0.5}U_{0.5}SiO₄ uranothorite. *Progress in Nuclear Energy* 57, 155–160.
- Couture R A, 1985.** Steam rapidly reduces the swelling capacity of bentonite. *Nature* 318, 50–52.
- Cramér P, Stendahl S, Erhag T, 2007.** Nationellt ansvar för använt kärnbränsle i en utvidgad europeisk union? SKB R-07-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Cramér P, Erhag T, Stendahl S, 2010.** Ansvarstagande i kärnbränslecykelns slutsteg – ett rättsligt perspektiv. SKB R-10-33, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Crawford J, 2008.** Bedrock transport properties Forsmark. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Crawford J, 2010.** Bedrock K_d data and uncertainty assessment for application in SR-Site geosphere transport calculations. SKB R-10-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Crawford J, Sidborn M, 2009.** Bedrock transport properties Laxemar. Site descriptive modelling, SDM-Site Laxemar. SKB R-08-94, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Cronstrand P, 2007.** Modelling the long-time stability of the engineered barriers of SFR with respect to climate changes. SKB R-07-51, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Cui D, Low J, Spahiu K, 2011.** Environmental behaviors of spent nuclear fuel and canister materials. *Energy & Environmental Science* 4, 2537–2545.

- Cui D, Rondinella V V, Fortner J A, Kropf A J, Eriksson L, Wronkiewicz D J, Spahiu K, 2012.** Characterization of alloy particles extracted from spent nuclear fuel. *Journal of Nuclear Materials* 420, 328–333.
- Curti E, Fujiwara K, Iijima K, Tits J, Cuesta C, Kitamura A, Glaus M A, Müller W, 2010.** Radium uptake during barite recrystallisation at 23 ± 2 °C as a function of solution composition: an experimental ^{133}Ba and ^{226}Ra tracer study. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74, 3553–3570.
- Curtis P, Petersson J, Triumf C-A, Isaksson H, 2010.** Site investigation SFR. Deformation zone modelling. Model version 0.1. SKB P-09-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Curtis P, Markström I, Petersson J, Triumf C-A, Isaksson H, Mattsson H, 2011.** Bedrock geology. Site investigation SFR. SKB R-10-49, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Cvetkovic V, 2010a.** Diffusion controlled tracer retention in crystalline rock on the field scale. *Geophysical Research Letters* 37, L13401. doi:10.1029/2010GL043445
- Cvetkovic V, 2010b.** Significance of fracture rim zone heterogeneity for tracer transport in crystalline rock. *Water Resources Research* 46, W03504. doi:10.1029/2009WR007755
- Cvetkovic V, 2011.** Tracer attenuation in groundwater. *Water Resources Research* 47, W12541. doi:10.1029/2011WR010999
- Cvetkovic V, 2012.** A general memory function for modeling mass transfer in groundwater transport. *Water Resources Research* 48, W04528. doi:10.1029/2011WR011657
- Cvetkovic V, Cheng H, 2011.** Evaluation of single-well injection-withdrawal tests in Swedish crystalline rock using the Lagrangian travel time approach. *Water Resources Research* 47, W02527. doi:10.1029/2010WR009627
- Cvetkovic V, Frampton A, 2010.** Transport and retention from single to multiple fractures in crystalline rock at Äspö (Sweden): 2. Fracture network simulations and generic retention model. *Water Resources Research* 46, W05506. doi:10.1029/2009WR008030
- Cvetkovic V, Frampton A, 2012.** Solute transport and retention in three-dimensional fracture networks. *Water Resources Research* 48, W02509. doi:10.1029/2011WR011086
- Cvetkovic V, Cheng H, Byegård J, Winberg A, Tullborg E-L, Widestrand H, 2010.** Transport and retention from single to multiple fractures in crystalline rock at Äspö (Sweden): 1. Evaluation of tracer test results and sensitivity analysis. *Water Resources Research* 46, W05505. doi:10.1029/2009WR008013
- Dahlström L-O, 2009.** Experiences from the design and construction of plug II in the Prototype Repository. Prototype Repository. SKB R-09-49, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Damjanac B, Fairhurst C, 2010.** Evidence for a long-term strength threshold in crystalline rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 43, 513–531.
- Darcel C, Davy P, Le Goc R, 2012.** Statistical fracture domain methodology for DFN modeling applied to site characterization. I Proceedings of International Symposium EUROCK 2012 - Rock engineering and technology for sustainable underground construction, Stockholm 28–30 May 2012. Stockholm: BeFo, Lissabon: International Society for Rock Mechanics.
- Darracq A, Destouni G, Persson K, Prieto C, Jarsjö J, 2010.** Scale and model resolution effects on the distributions of advective solute travel times in catchments. *Hydrological Processes* 24, 1697–1710.
- Davy P, Le Goc R, Darcel C, 2013.** A model of fracture nucleation, growth and arrest, and consequences for fracture density and scaling. *Journal of Geophysical Research* 118, 1393–1407.
- Deditius A P, Pointeau V, Zhang J M, Ewing R C, 2012.** Formation of nanoscale Th-coffinite. *American Mineralogist* 97, 681–693.
- Delafoy C, Zemek M, 2010.** Washout behaviour of chromia-doped UO_2 and gadolinia fuels in LWR environments. I Advanced fuel pellet materials and fuel rod design for water cooled reactors: proceedings of a Technical Committee meeting held in Villigen, 23–26 november 2009. IAEA-TECDOC-1654, International Atomic Energy Agency, 127–138.
- Delos A, Trinchero P, Richard L, Molinero J, Dentz M, Pitkänen P, 2010.** Quantitative assessment of deep gas migration in Fennoscandian sites. SKB R-10-61, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Destouni G, Persson K, Prieto C, Jarsjö J, 2010.** General quantification of catchment-scale nutrient and pollutant transport through the subsurface to surface and coastal waters. *Environmental Science & Technology* 44, 2048–2055.
- Dillström P, Bolinder T, 2010.** Damage tolerance analysis of canister inserts for spent nuclear fuel in the case of an earthquake induced rock shear load. SKB TR-10-29, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Dillström P, Alverlind L, Andersson M, 2010.** Framtagning av acceptanskriterier samt skadetålighetsanalyser av segjärnsinsatsen. SKB R-10-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Dohrmann R, Genske D, Karnland O, Kaufhold S, Kiviranta L, Olsson S, Plötze M, Sandén T, Sellin P, Svensson D, Valter M, 2012a.** Interlaboratory CEC and exchangeable cation study of bentonite buffer materials: II. Alternative methods. *Clays and Clay Minerals* 60, 176–185.
- Dohrmann R, Genske D, Karnland O, Kaufhold S, Kiviranta L, Olsson S, Plötze M, Sandén T, Sellin P, Svensson D, Valter M, 2012b.** Interlaboratory CEC and exchangeable cation study of bentonite buffer materials: I. Cu(II)-triethylenetetramine method. *Clays and Clay Minerals* 60, 162–175.
- Drake H, Tullborg E-L, MacKenzie A B, 2009.** Detecting the near-surface redox front in crystalline bedrock using fracture mineral distribution, geochemistry and U-series disequilibrium. *Applied Geochemistry* 24, 1023–1039.
- Drake H, Tullborg E-L, Hogmalm J, Åström M E, 2012.** Trace metal distribution and isotope variations in low-temperature calcite and groundwater in granitoid fractures down to 1 km depth. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 84, 217–238.
- Drake H, Åström M E, Tullborg E-L, Whitehouse M, Fallick A E, 2013.** Variability of sulphur isotope ratios in pyrite and dissolved sulphate in granitoid fractures down to 1 km depth – Evidence for widespread activity of sulphur reducing bacteria. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 102, 143–161.
- Dreissig I, Weiss S, Hennig C, Bernhard G, Zänker H, 2011.** Formation of uranium(IV)-silica colloids at near-neutral pH. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75, 352–367.
- Driesschaert E, Fichet T, Goosse H, Huybrechts P, Janssens I, Mouchet A, Munhoven G, Brovkin V, Weber S L, 2007.** Modeling the influence of Greenland ice sheet melting on the Atlantic meridional overturning circulation during the next millennia. *Geophysical Research Letters* 34. doi:10.1029/2007GL029516
- Dueck A, Börgesson L, Johannesson L-E, 2010.** Stress-strain relation of bentonite at undrained shear. Laboratory tests to investigate the influence of material composition and test technique. SKB TR-10-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Dueck A, Goudarzi R, Börgesson L, 2011.** Buffer homogenisation, status report. SKB TR-12-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Duro L, Grivé M, Domènech C, Roman-Ross G, Bruno J, 2012a.** Assessment of the evolution of the redox conditions in SFR-1. Resolution. SKB TR-12-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Duro L, Grivé M, Gaona X, Bruno J, Andersson T, Borén H, Dario M, Allard B, Hagberg J, Källström K, 2012b.** Study of the effect of the fibre mass UP2 degradation products on radionuclide mobilisation. SKB R-12-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Egan Sjölander A, 2007.** Som natt och dag trots samma kärnas ursprung? Om (o)likheter och opinioner i nationella och lokala/regionala mediers hantering av kärnavfallsfrågan. SKB R-07-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ekeröth E, Cui D, Low J, Granfors M, Zwicky H-U, Spahiu K, Evins L Z, 2012.** Instant release fractions from corrosion studies with high burnup LWR fuel. I Scientific basis for nuclear waste management XXXV. Warrendale, PA: Materials Research Society. (Materials Research Society Symposium Proceedings 1475), 125–130.
- Ekman L, Ekman M, Gustafson L, Gustafson B, 2013.** Quality control of GPS deformation data from Forsmark and analysis of crustal deformation in the local scale. SKB R-13-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Emborg M, Jonasson J-E, Knutsson S, 2007.** Långtidsstabilitet till följd av frysning och tining av betong och bentonit vid förvaring av låg- och medelaktivt kärnavfall i SFR 1. SKB R-07-60, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Emmrich M, Winfield I J, Guillard J, Rustadbakken A, Vergès C, Volta P, Jeppesen E, Lauridsen T L, Bruce S, Holmgren K, Argillier C, Mehner T, 2012.** Strong correspondence between gillnet catch per unit effort and hydroacoustically derived fish biomass in stratified lakes. *Freshwater Biology* 57, 2436–2448.
- Enarsson Å, Landgren A, Liljenzin J-O, Skålberg M, Spjuth L, Gudowski W, Wallenius J, 1998.** Separation och transmutation (S&T) 1997. En genomgång av nuläget. SKB R-98-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Engdahl A, Ternsell A, Hannu S, 2006.** Oskarshamn site investigation. Chemical characterisation of deposits and biota. SKB P-06-320, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Engdahl A, Rådén R, Borgiel M, Omberg L-G, 2008.** Oskarshamn and Forsmark site investigation. Chemical composition of suspended material, sediment and pore water in lakes and sea bays. SKB P-08-81, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Engels S, Helmens K, 2010.** Holocene environmental changes and climate development in Greenland. SKB R-10-65, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Engels S, Helmens K F, Väiliranta M, Brooks J, Birks H J B, 2010.** Early Weichselian (MIS 5d and 5c) temperatures and environmental changes in northern Fennoscandia as recorded by chironomids and macroremains at Sokli, northeast Finland. *Boreas* 39, 689–704.
- Engström J, Paananen M, Klint K E, 2012.** The Greenland Analogue Project. Geomodel version 1 of the Kangerlussuaq area on Western Greenland. SKB P-11-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Erichsen A C, Møhlenberg F, Closter R M, Sandberg J, 2010.** Models for transport and fate of carbon, nutrients and radionuclides in the aquatic ecosystem at Öregrundsgrepen. SKB R-10-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Erichsen A C, Konovalenko L, Møhlenberg F, Closter R M, Bradshaw C, Aquilonius K, Kautsky U, 2013.** Radionuclide transport and uptake in coastal aquatic ecosystems: a comparison of a 3D dynamic model and a compartment model. *Ambio* 42, 464–475.
- Ericsson L O, Holmén J, 2010.** Storregional grundvattenmodellering – en känslighetsstudie av några utvalda konceptuella beskrivningar och förenklingar. SKB R-10-43, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ericsson L O, Brinkhoff P, Gustafson G, Kvartsberg S, 2009.** Hydraulic features of the excavation disturbed zone – Laboratory investigations of samples taken from the Q- and S-tunnels at Äspö HRL. SKB R-09-45, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Eriksen T E, Shoesmith D W, Jonsson M, 2012.** Radiation induced dissolution of UO₂ based nuclear fuel – A critical review of predictive modelling approaches. *Journal of Nuclear Materials* 420, 409–423.
- Eriksson C, Engqvist A, 2013.** Water exchange on a geological timescale – examples from two coastal sites in the Baltic Sea. *Ambio* 42, 447–454.
- Evins L Z, Jensen K A, 2012.** Review of spatial relationships between uraninite and coffinite – implications for alteration mechanisms. I Scientific basis for nuclear waste management XXXV. Warrendale, PA: Materials Research Society. (Materials Research Society Symposium Proceedings 1475), 89–96.
- Evins L Z, Vähänen M (red), 2012.** REDUPP. First annual report. Posiva Working Report 2012-28, Posiva Oy, Finland.
- Ewart F, Greenfield B F, Haworth A, Rosevear A, Williams S J, 1991.** The effects of organics in SFR on sorption coefficients. SKB SFR 91-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Fanger G, Skagius K, Wiborgh M, 2001.** Projekt SAFE. Complexing agents in SFR. SKB R-01-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Fernández A M, Villar M V, 2010.** Geochemical behaviour of bentonite barrier in the laboratory after up to 8 years of heating and hydration. *Applied Geochemistry* 25, 809–824.
- Ferry C, Piron J-P, Stout R, 2007.** Effect of helium accumulation on the spent fuel microstructure. I Dunn D, Poinssot C, Begg B (red). Scientific basis for nuclear waste management XXX: symposium held in Boston, Massachusetts, USA, 27 November – 1 December 2006. Warrendale, PA: Materials Research Society. (Materials Research Society Symposium Proceedings 985), 65–70.
- Ferry C, Piron J-P, Poutesquen A, Poinssot C, 2008.** Radionuclides release from the spent fuel under disposal conditions: re-evaluation of the Instant Release Fraction. I Lee W E, Roberts J W, Hyatt N C, Grimes R W (red). Scientific basis for nuclear waste management XXXI: symposium held in Sheffield, United Kingdom, 16–21 September 2007. Warrendale, PA: Materials Research Society. (Materials Research Society Symposium Proceedings 1107), 447–454.
- Ferry C, Piron J-P, Ambard A, 2010.** Effect of helium on the microstructure of spent fuel in a repository: an operational approach. *Journal of Nuclear Materials* 407, 100–109.
- Fiori A, Boso F, de Barros F P J, De Bartolo S, Frampton A, Severino G, Suweis S, Dagan G, 2010.** An indirect assessment on the impact of connectivity of conductivity classes upon longitudinal asymptotic macrodispersivity. *Water Resources Research* 46, W08601. doi:10.1029/2009WR008590
- FKA, 2013.** Planering inför avveckling av FKA:s reaktorläggningar. FKA-2005-54, FKA, Sverige.
- Follin S, Stigsson M, Rhén I, Engström J, Klint K E, 2011.** Greenland Analogue Project – Hydraulic properties of deformation zones and fracture domains at Forsmark, Laxemar and Olkiluoto for usage together with Geomodel version 1. SKB P-11-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Forsyth R, 1997.** The SKB Spent Fuel Corrosion Programme. An evaluation of results from the experimental programme performed in the Studsvik Hot Cell Laboratory. SKB TR 97-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Frampton A, 2013.** Fracture transmissivity estimation using natural gradient flow measurements in sparsely fractured rock. I Sharp J M, Troeger U (red). *Fractured rock hydrogeology: selected papers*, International Association of Hydrogeologists. London: Taylor & Francis.

- Frampton A, Cvetkovic V, 2011.** Numerical and analytical modeling of advective travel times in realistic three-dimensional fracture networks. *Water Resources Research* 47, W02506. doi:10.1029/2010WR009290
- Fransson Å, 2009.** Literature survey: Relations between stress change, deformation and transmissivity for fractures and deformation zones based on *in situ* investigations. SKB R-09-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Frostenson M, 2008.** Etisk argumentation i slutförvarsfrågan. Etiska värderingskonflikter i diskussionen om det svenska kärnavfallet. SKB R-08-51, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Frostenson M, 2010.** Slutförvarets industriella organisation. Fallgrop eller följdriktighet? SKB R-10-55, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Fälth B, Hökmark H, 2006.** Seismically induced slip on rock fractures. Results from dynamic discrete fracture modeling. SKB R-06-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Fälth B, Hökmark H, Munier R, 2010.** Effects of large earthquakes on a KBS-3 repository. Evaluation of modelling results and their implications for layout and design. SKB TR-08-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Gascoyne M, 2000.** A review of published literature on the effects of permafrost on the hydrogeochemistry of bedrock. SKB R-01-56, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Gaucher E, Tournassat C, Nowak C, 2005.** Modelling the geochemical evolution of the multi-barrier system of the Silo of the SFR repository. Final report. SKB R-05-80, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Geier J, 2010.** Investigation of discrete-fracture network conceptual model uncertainty at Forsmark. Report 2011:13, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- Gent P R, Danabasoglu G, Donner L J, Holland M M, Hunke E C, Jayne S R, Lawrence D M, Neale R B, Rasch P J, Vertenstein M, Worley P H, Yang Z-L, Zhang M, 2011.** The Community Climate System Model Version 4. *Journal of Climate* 24, 4973–4991.
- Glamheden R, Hökmark H, 2010.** Creep in jointed rock masses. State of knowledge. SKB R-06-94, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Glamheden R, Lanaro F, Karlsson J, Lindberg U, Wrafter J, Hakami H, Johansson M, 2008.** Rock mechanics Forsmark. Modelling stage 2.3. Complementary analysis and verification of the rock mechanics model. SKB R-08-66, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Glamheden R, Fälth B, Jacobsson L, Harrström J, Berglund J, Bergkvist L, 2010.** Counterforce applied to prevent spalling. SKB TR-10-37, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Glaus M A, Van Loon L R, 2008.** Degradation of cellulose under alkaline conditions: new insights from a 12 years degradation study. *Environmental Science & Technology* 42, 2906–2911.
- Glaus M A, Van Loon L R, Achatz S, Chodura A, Fischer K, 1999.** Degradation of cellulosic materials under the alkaline conditions of a cementitious repository for low and intermediate level radioactive waste. Part I: Identification of degradation products. *Analytica Chimica Acta* 398, 111–122.
- Godinho J R A, Piazzolo S, Stennett M C, Hyatt N C, 2011.** Sintering of CaF₂ pellets as nuclear fuel analogue for surface stability experiments. *Journal of Nuclear Materials* 419, 46–51.
- Godinho J R A, Piazzolo S, Evins L Z, 2012.** Effect of surface orientation on dissolution rates and topography of CaF₂. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 86, 392–403.
- Gorbatov O I, Korzhavyi, P A, Ruban A V, Gornostyrev Y N, 2011a.** Dependency of vacancy–solute interactions on magnetic state in dilute iron-based alloys. *Solid State Phenomena* 172–174, 979–984.
- Gorbatov O I, Korzhavyi P A, Ruban A V, Johansson B, Gornostyrev Y N, 2011b.** Vacancy-solute interactions in ferromagnetic and paramagnetic bcc iron: *Ab initio* calculations. *Journal of Nuclear Materials* 419, 248–255
- Goudarzi R, 2012.** Prototype Repository – Sensor data report (period 100917–110101). Report no 24. SKB P-12-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Grambow B, Bruno J, Duro L, Merino J, Tamayo A, Martin C, Pepin G, Schumacher S, Smidt O, Ferry C, Jegou C, Quiñones J, Iglesias E, Rodriguez Villagra N, Nieto J M, Martinez-Esparza A, Loida A, Metz V, Kienzler B, Bracke G, Pellegrini D, Mathieu G, Wasselin-Trupin V, Serres C, Wegen D, Jonsson M, Johnson L, Lemmens K, Liu J, Spahiu K, Ekeröth E, Casas I, de Pablo J, Watsson C, Robinson P, Hodgkinson D, 2010.** Final activity report: project MICADO. Model uncertainty for the mechanism of dissolution of spent fuel in nuclear waste repository. European Commission.
- Grambow B, Ferry C, Casas I, Bruno J, Quinones J, Johnson L, 2011.** Spent fuel waste disposal: analyses of model uncertainty in the MICADO project. *Energy Procedia* 7, 487–494.
- Grandia F, Galíndez J-M, Arcos D, Molinero J, 2010.** Quantitative modelling of the degradation processes of cement grout. Project CEMMOD. SKB TR-10-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Grandia F, Sena C, Arcos D, Molinero J, Duro L, Bruno J, 2011.** Quantitative assessment of radionuclide retention in the Quaternary sediments/granite interface of the Fennoscandian shield (Sweden). *Applied Geochemistry* 26, 679–687.
- Green M, 2010.** Oskarshamn site investigations. Bird monitoring in Simpevarp 2002–2009. SKB P-10-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Green M, 2011.** Monitoring Forsmark. Bird monitoring in Forsmark 2010. SKB P-11-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Greenfield B F, Robertson G P, Spindler M W, Harrison W N, Somers P J, 1993.** Mechanistic studies of the alkaline degradation of cellulose in cement. Nirex Report NSS/R272, AEA Technology, UK.
- Griffiths G M, Garrett T J, Cloutier W A, Adler J J, 2008.** Decommissioning cost analysis for Barsebäck nuclear station. Document S33-1567-002 rev 0, TLG Services Inc, USA.
- Grimsel, 2013.** Colloid formation and migration introduction. Tillgänglig: <http://www.grimsel.com/gts-phase-vi/cfm-section/cfm-introduction>
- Grolander S, Roos P, 2009.** Forsmark site investigation. Analysis of radioactive isotopes in near surface groundwater, surface water, biota and soil. SKB P-09-66, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Grundfelt B, 2010.** Jämförelse mellan KBS-3-metoden och deponering i djupa borrhål för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle. SKB R-10-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Grundfelt B, 2013.** Radiological consequences of accidents during disposal of spent nuclear fuel in a deep borehole. SKB P-13-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Gu B X, Wang L M, Minc L D, Ewing R C, 2001.** Temperature effects on the radiation stability and ion exchange capacity of smectites. *Journal of Nuclear Materials* 297, 345–354.
- Guillaume D, Neaman A, Cathelineau M, Mosser-Ruck R, Peiffert C, Abdelmoula M, Dubessy J, Villiéras F, Michau N, 2004.** Experimental study of the transformation of smectite at 80 and 300°C in the presence of Fe oxides. *Clay Minerals* 39, 17–34.
- Gylling B, 1997.** Development and applications of the channel network model for simulations of flow and transport in fractured rock. Doktorsavh. Kungliga Tekniska högskolan, Institutionen för kemiteknik.
- Gårdenäs A, Eckersten H, Reinert A, Gustafsson D, Jansson P-E, Ekström P-A, Avila R, Greger M, 2009.** Tracey – a simulation model of trace element fluxes in soil-plant system for long-term assessment of a radioactive groundwater contamination. SKB TR-09-24, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hakala M, Siren T, Kempainen K, Christiansson R, Martin C D, 2013.** In situ stress measurements with the new LVDT-cell – method description and verification. Posiva Report 2012-43, Posiva Oy, Finland.
- Hakami E, 2011.** Rock stress orientation measurements using induced thermal spalling in slim boreholes. SKB R-11-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hakami E, Min K-B, 2009.** Modelling of the state of stress. Preliminary site description Laxemar subarea – version 1.2. SKB R-06-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hakami H, 2006.** Numerical studies on spatial variation of the in situ stress field at Forsmark – a further step. Site descriptive modelling, Forsmark – stage 2.1. SKB R-06-124, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hallbeck L, 2010.** Principal organic materials in a repository for spent nuclear fuel. SKB TR-10-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hallbeck L, Pedersen K, 2008.** Explorative analysis of microbes, colloids and gases. SDM-Site Forsmark. SKB R-08-85, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hallbeck L, Pedersen K, 2012.** Culture-dependent comparison of microbial diversity in deep granitic groundwater from two sites considered for a Swedish final repository of spent nuclear fuel. *FEMS Microbiology Ecology* 81, 66–77.
- Hallbeck L, Edlund J, Eriksson L, 2012.** Microbial analyses of groundwater and surfaces during the retrieval of experiment 3, A04, in MINICAN. SKB P-12-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hallberg B, Eriksson T, 2008.** Preliminär avvecklingsplan för Clink. SKB P-08-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hallberg B, Tiberg L, 2010.** Preliminär plan för avveckling – slutförvar för använt kärnbränsle. SKB P-10-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hammond G E, Lichtner P C, Rockhold M L, 2011.** Stochastic simulation of uranium migration at the Hanford 300 area. *Journal of Contaminant Hydrology* 120–121, 115–128.
- Hannu S, Karlsson S, 2006.** Forsmark site investigation. Chemical characterisation of deposits and biota. SKB P-06-220, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Hansen J P, 2012.** Effects of shore-level displacement on ecology of Baltic Sea bays. SKB TR-13-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hansson S O, 2010.** Etiska och filosofiska perspektiv på kärnavfallsfrågan – åtta essäer av Sven-Ove Hansson. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hansson S O, 2012.** Tidsperspektiven i svenska samhällsbeslut. SKB R-12-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Harper J, Hubbard A, Ruskeeniemi T, Claesson Liljedahl L, Lehtinen A, Booth A, Brinkerhoff D, Drake H, Dow C, Doyle S, Engström J, Fitzpatrick A, Frapé S, Henkemans E, Humphrey N, Johnson J, Jones G, Joughin I, Klint K E, Kukkonen I, Kulessa B, Landowski C, Lindbäck K, Makahnouk M, Meierbachtol T, Pere T, Pedersen K, Pettersson R, Pimentel S, Quincey D, Tullborg E-L, van As D, 2011.** The Greenland Analogue Project. Yearly report 2010. SKB R-11-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Harrington J F, Volckaert G, Noy D J, 2013.** Long-term impact of temperature on the hydraulic permeability of bentonite. Geological Society Special Publication. (Under utgivning.)
- Hartikainen J, Kouhia R, Wallroth T, 2010.** Permafrost simulations at Forsmark using a numerical 2D thermo-hydro-chemical model. SKB TR-09-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- He M, Jiang S, Jiang S, Diao L, Wu S, Li C, 2002.** Measurements of the half-life of ⁷⁹Se with PX-AMS. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 194, 393–398.
- Hedberg P, Kotowski W, Saetre P, Mälson K, Rydin H, Sundberg S, 2012.** Vegetation recovery after multiple-site experimental fen restorations. Biological Conservation 147, 60–67.
- Hedin A, 2002.** Integrated analytic radionuclide transport model for a spent nuclear fuel repository in saturated fractured rock. Nuclear Technology 138, 179–2005.
- Hedin, 2013a.** Sensitivity analyses of a fast analytical radionuclide transport model. I Proceedings of 7th International Conference on Sensitivity Analysis of Model Output, 1–4 July 2013, Nice. Tillgänglig: http://www.gdr-mascotnum.fr/media/poster_proceedings.pdf
- Hedin, 2013b.** Sensitivity analysis of probabilistic dose results in SKB's license application. I Proceedings of 14th IHLRWM conference, Albuquerque, 28 April–2 May 2013.
- Hedström M, Birgersson M, Nilsson U, Karnland O, 2011.** Role of cation mixing in the sol formation of Ca/Na-montmorillonite. Physics and Chemistry of the Earth 36, 1564–1571.
- Hedvall R, 2013.** Avvecklingsplan för Ågestaanläggningen. Dok.ID N-13-008, Vattenfall AB.
- Helmens K F, Engels S, 2010.** Ice-free conditions in eastern Fennoscandia during early Marine Isotope Stage 3: lacustrine records. Boreas 39, 399–409.
- Helmens K F, Väiliranta M, Engels S, Shala S, 2012.** Large shifts in vegetation and climate during the Early Weichselian (MIS 5d-c) inferred from multi-proxy evidence at Sokli (northern Finland). Quaternary Science Reviews 41, 22–38.
- Hernelind J, 2010.** Modelling and analysis of canister and buffer for earthquake induced rock shear and glacial load. SKB TR-10-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hessen D O, Tranvik L J, 1998.** Aquatic humic substances: ecology and biogeochemistry. Berlin: Springer.
- Hiroki A, LaVerne J A, 2005.** Decomposition of hydrogen peroxide at water-ceramic oxide interfaces. The Journal of Physical Chemistry B 109, 3364–3370.
- Holgersson S, 2009.** Oskarshamn site investigation. Batch experiments of I, Cs, Sr, Ni, Eu, U and Np sorption onto soil from the Laxemar area. SKB P-09-29, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Holgersson S, 2012.** Studies on batch sorption methodologies: Eu sorption onto Kivetty granite. Procedia Chemistry 7, 629–640.
- Holgersson S, Dubois I, Börstell L, 2011.** Batch experiments of Cs, Co and Eu sorption onto cement with dissolved fibre mass UP2 in the liquid phase. SKB P-11-24, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Holmboe M, Wold S, Jonsson M, García-García S, 2009.** Effects of γ -irradiation on the stability of colloidal Na⁺-montmorillonite dispersions. Applied Clay Science 43, 86–90.
- Holmboe M, Norrfors K K, Jonsson M, Wold S, 2011.** Effect of γ -radiation on radionuclide retention in compacted bentonite. Radiation Physics and Chemistry 80, 1371–1377.
- Holmboe M, Jonsson M, Wold S, 2012.** Influence of γ -radiation on the reactivity of montmorillonite towards H₂O₂. Radiation Physics and Chemistry 81, 190–194.
- Holmén J G, 2005.** SFR-1. Inverse modelling of inflow to tunnels and propagation of estimated uncertainties to predictive stages. SKB R-05-74, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Holmén J G, Stigsson M, 2001.** Modelling of future hydrogeological conditions at SFR. SKB R-01-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Huang W-L, Longo J M, Pevear D R, 1993.** An experimentally derived kinetic model for smectite-to-illite conversion and its use as a geothermometer. *Clays and Clay Minerals* 41, 162–177.
- Hudson J A, 1992.** Rock engineering systems: theory and practice. New York: Ellis Horwood.
- Hudson J A, Bäckström A, Rutqvist J, Jing L, Backers T, Chijimatsu M, Christiansson R, Feng X-T, Kobayashi A, Koyama T, Lee H-S, Neretnieks I, Pan P-Z, Rinne M, Shen B-T, 2009.** Characterising and modelling the excavation damaged zone in crystalline rock in the context of radioactive waste disposal. *Environmental Geology* 57, 1275–1297.
- Hultquist G, Graham M J, Szakálos P, Sproule G I, Rosengren A, Gråsjö L, 2011.** Hydrogen gas production during corrosion of copper by water. *Corrosion Science* 53, 310–319.
- Hultquist G, Graham M J, Kodra O, Moisa S, Liu R, Bexell U, Smialek J L, 2013.** Corrosion of copper in distilled water without molecular oxygen and the detection of produced hydrogen. Report 2013:07, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- Huutoniemi T, Larsson A, Blank E, 2012.** Melting of metallic intermediate level waste. SKB R-12-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hökmark H, Fälth B, Wallroth T, 2006.** T-H-M couplings in rock. Overview of results of importance to the SR-Can safety assessment. SKB R-06-88, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hökmark H, Lönnqvist M, Kristensson O, Sundberg J, Hellström G, 2009.** Strategy for thermal dimensioning of the final repository for spent nuclear fuel. SKB R-09-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hökmark H, Lönnqvist M, Fälth B, 2010.** THM-issues in repository rock. Thermal, mechanical, thermo-mechanical and hydro-mechanical evolution of the rock at the Forsmark and Laxemar sites. SKB TR-10-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- IAEA, 2010.** Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer to humans in terrestrial and freshwater environments. Vienna: International Atomic Energy Agency. (IAEA Technical Reports Series 472)
- IEG, 2010.** Tillämpningsdokument: observationsmetoden i geotekniken. Rapport 9:2010, Implementeringskommissionen för Europastandarder inom Geoteknik.
- IGD-TP, 2011.** Strategic Research Agenda (SRA). Stockholm : IGD-TP. Tillgänglig: http://www.igdtp.eu/index.php/key-documents/doc_download/14-strategic-research-agenda
- IGD-TP, 2012.** IGD-TP: Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform. Deployment plan 2011–2016. Tillgänglig: http://www.igdtp.eu/index.php/key-documents/doc_download/65-deployment-plan-2011-2016
- Ikonen A T K, Smith K, Robinson C A, De La Cruz I, Lindborg T, Thiry Y, Strand P, Norris S, 2011.** Non-human biota assessments for geological disposal facilities – a study of the key uncertainties and importance for dose estimates. *Radioprotection* 46, S283–S288.
- Ittner H, 2011.** Support design for deposition tunnels: a case study of the TASS tunnel in Äspö Hard Rock Laboratory. Examensarbete. Institutionen för bygg- och miljöteknik, Chalmers tekniska högskola.
- Jacobsson L, 2006a.** Forsmark site investigation. Borehole KFM01D. Triaxial compression test of intact rock. SKB P-06-214, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Jacobsson L, 2006b.** Oskarshamn site investigation. Borehole KLX11A. Triaxial compression test of intact rock. SKB P-06-272, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Janeczek J, Ewing R C, 1992.** Dissolution and alteration of uraninite under reducing conditions. *Journal of Nuclear Materials* 190, 157–173.
- Jansson M, Bergström A-K, Blomqvist P, Drakare S, 2000.** Allochthonous organic carbon and phytoplankton/bacterioplankton relationships in lakes. *Ecology Letters* 81, 3250–3255.
- Jansson P, 2010.** Ice sheet hydrology from observations. SKB TR-10-68, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Jansson P, Näslund J-O, Rodhe L, 2007.** Ice sheet hydrology – a review. SKB TR-06-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Jaquet O, Namar R, Jansson P, 2010.** Groundwater flow modelling under ice sheet conditions. Scoping calculations. SKB R-10-46, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Jaquet O, Namar R, Siegel P, 2012.** Groundwater flow modelling under ice sheet conditions in Greenland (phase II). SKB R-12-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Jensen M, 1993.** Conservation and retrieval of information: elements of a strategy to inform future societies about nuclear waste repositories: final report of the Nordic Nuclear Safety Research project KAN-1.3. København: Nordisk Ministerråd. Tillgänglig: <http://www.nks.org/scripts/getdocument.php?file=111010111119462> [2013-02-25].
- Jin L-Z, Sandström R, 2012.** Numerical simulation of residual stresses for friction stir welds in copper canisters. *Journal of Manufacturing Processes* 14, 71–81.
- Jodin-Caumon M-C, Mosser-Ruck R, Rousset D, Randi A, Cathelineau M, Michau N, 2010.** Effect of a thermal gradient of iron–clay interactions. *Clays and Clay Minerals* 58, 667–681.
- Johannesson L-E, Gunnarsson D, Sandén T, Börgesson L, Karlzén R, 2004.** Äspö Hard Rock Laboratory. Prototype Repository. Installation of buffer, canisters, backfill, plug and instruments in Section II. SKB IPR-04-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Johanson K J, Nikolova I, Taylor A F S, Vinichuk M M, 2004.** Uptake of elements by fungi in the Forsmark area. SKB TR-04-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Johansson A J, Brinck T, 2012.** Mechanisms and energetics of surface reactions at the copper–water interface. A critical literature review with implications for the debate on corrosion of copper in anoxic water. SKB TR-12-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Johansson A J, Lilja C, Brinck T, 2011.** On the formation of hydrogen gas on copper in anoxic water. *Journal of Chemical Physics* 135, 084709. doi:10.1063/1.3624788
- Johansson A M, Jansson P, Brown I A, 2013.** Spatial and temporal variations in lakes on the Greenland Ice Sheet. *Journal of Hydrology* 476, 314–320.
- Johansson P, Lisberg Jensen E, 2006.** Identitet och trygghet i tid och rum – kulturteoretiska perspektiv på kärnavfallsfrågans existentiella dimensioner. SKB R-06-119, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Johnson L, Günther-Leopold I, Kobler Waldis J, Linder H P, Low J, Cui D, Ekeroth E, Spahiu K, Evins L Z, 2012.** Rapid aqueous release of fission products from high burn-up LWR fuel: experimental results and correlations with fission gas release. *Journal of Nuclear Materials* 420, 54–62.
- Johnsson A, 2011.** Tests for evaluation of pellets as foundation bed material KBP1003 – ÅSKAR. SKB P-11-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Joyce S, Simpson T, Hartley L, Applegate D, Hoek J, Jackson P, Roberts D, Swan D, Gylling B, Marsic N, Rhén I, 2010.** Groundwater flow modelling of periods with temperate climate conditions – Laxemar. SKB R-09-24, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Juhlin C, Lund B, 2011.** Reflection seismic studies over the end-glacial Burträsk fault, Skellefteå, Sweden. *Solid Earth* 2, 9–16.
- Juhlin C, Wallroth T, Smellie J, Eliasson T, Ljunggren C, Leijon B, Beswick J, 1998.** The Very Deep Hole concept: Geoscientific appraisal of conditions at great depth. SKB TR 98-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Juston J, 2010.** Water and carbon balance modeling: methods of uncertainty analysis. Licentiatavh. Skolan för arkitektur och samhällsbyggnad, Kungliga Tekniska högskolan.
- Juston J M, 2012.** Environmental modelling: learning from uncertainty. Doktorsavh. Kungliga Tekniska högskolan, Skolan för arkitektur och samhällsbyggnad (ABE), Mark- och vattenteknik.
- Jägevall S, Rabe L, Pedersen K, 2011.** Abundance and diversity of biofilms in natural and artificial aquifers of the Äspö Hard Rock Laboratory, Sweden. *Microbial Ecology* 61, 410–422.
- Jörg G, Bühnenmann R, Hollas S, Kivel N, Kossert K, Van Winckel S, Gostomski C L, 2010.** Preparation of radiochemically pure ⁷⁹Se and highly precise determination of its half-life. *Applied Radiation and Isotopes* 68, 2339–2351.
- Kajiser A, Högselius P, 2007.** Resurs eller avfall? Politiska beslutsprocesser kring använt kärnbränsle i Finland, Tyskland, Ryssland och Japan. SKB R-07-37, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Karlsson A, Eriksson C, Borell Löfstedt C, Liungman O, Engqvist A, 2010.** High-resolution hydrodynamic modelling of the marine environment at Forsmark between 6500 BC and 9000 AD. SKB R-10-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Karlsson S, Bergström U, 2002.** Nuclide documentation. Element specific parameter values used in the biospheric models of the safety assessments SR 97 and SAFE. SKB R-02-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Karlzén R, Johansson E, 2010.** Slutrapport från drivningen av TASS-tunneln. SKB R-10-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Karnland O, 2010.** Chemical and mineralogical characterization of the bentonite buffer for the acceptance control procedure in a KBS-3 repository. SKB TR-10-60, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Karnland O, Olsson S, Nilsson U, 2006.** Mineralogy and sealing properties of various bentonites and smectite-rich clay materials. SKB TR-06-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Karnland O, Olsson S, Dueck A, Birgersson M, Nilsson U, Hernan-Håkansson T, Pedersen K, Nilsson S, Eriksen T E, Rosborg B, 2009.** Long term test of buffer material at the Äspö Hard Rock Laboratory, LOT project. Final report on the A2 test parcel. SKB TR-09-29, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Karnland O, Olsson S, Sandén T, Fälth B, Jansson M, Eriksen T E, Svärdström K, Rosborg B, Muurinen A, 2011.** Long term test of buffer material at the Äspö HRL, LOT project. Final report on the A0 test parcel. SKB TR-09-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kaufhold S, Dohrmann R, Sandén T, Sellin P, Svensson D, 2013.** Mineralogical investigations of the first package of the alternative buffer material test – I. Alteration of bentonites. *Clay Minerals* 48, 199–213.
- Kautsky U (red), 2001.** The biosphere today and tomorrow in the SFR area. SKB R-01-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kautsky U, Lindborg T, Valentin J, 2013a.** Humans and ecosystems over the coming millennia: overview of a biosphere assessment of radioactive waste disposal in Sweden. *Ambio* 42, 383–392.
- Kautsky U, Lindborg T, Valentin J (red), 2013b.** Humans and ecosystems over the coming millennia: a biosphere assessment of radioactive waste disposal in Sweden. *Ambio* 42, 381–526.
- Keiding M, Lund B, Árnadóttir T, 2009.** Earthquakes, stress, and strain along an obliquely divergent plate boundary; Reykjanes Peninsula, southwest Iceland. *Journal of Geophysical Research* 114. doi:10.1029/2008JB006253
- Keskitalo C, Nordlund A, Lindgren U, 2009.** Grunden för beslut i kärnavfallsfrågan. Upplevelser av lagstiftningsgrund och MKB-process. SKB R-09-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kim J W, Dong H, Seabaugh J, Newell S W, Eberl D D, 2004.** Role of microbes in the smectite-to-illite reaction. *Science* 303, 830–832.
- King F, 2010a.** Stress corrosion cracking of carbon steel used fuel containers in a Canadian deep geological repository in sedimentary rock. NWMO TR-2010-21, Nuclear Waste Management Organization, Canada.
- King F, 2010b.** Critical review of the literature on the corrosion of copper by water. SKB TR-10-69, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- King F, Lilja C, 2011.** Scientific basis for corrosion of copper in water and implications for canister lifetimes. *Corrosion Engineering, Science and Technology* 46, 153–158.
- King F, Newman R, 2010.** Stress corrosion cracking of copper canisters. SKB TR-10-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- King F, Lilja C, Pedersen K, Pitkänen P, Vähänen M, 2010.** An update of the state-of-the-art report on the corrosion of copper under expected conditions in a deep geologic repository. SKB TR-10-67, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- King F, Johansson A J, Lilja C, 2013a.** Reply to ‘Comments to article: Scientific basis for corrosion of copper in water and implications for canister lifetimes published in *Corrosion Engineering, Science and Technology* 46(2), 2011, 153–158’. *Corrosion Engineering, Science and Technology*. doi:10.1179/1743278213Y.0000000098
- King F, Lilja C, Vähänen M, 2013b.** Progress in the understanding of the long-term corrosion behaviour of copper canisters. *Journal of Nuclear Materials* 438, 228–237.
- Kinnunen P, Varis P, 2011.** Stress corrosion cracking investigation of copper in groundwater with ammonium under potential polarisation. Posiva Working Report 2011-05, Posiva Oy, Finland.
- Kjellström E, Strandberg G, Brandefelt J, Näslund J-O, Smith B, Wohlfarth B, 2009.** Climate conditions in Sweden in a 100,000-year time perspective. SKB TR-09-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Konovalenko L, 2012.** Element transport in marine coastal ecosystems – modelling general and element-specific mechanisms. Doktorsavh. Stockholms universitet.
- Konovalenko L, Bradshaw C, Kumblad L, Kautsky U, 2013.** Radionuclide transfer in marine coastal ecosystems, a modelling study using metabolic processes and site data. *Journal of Environmental Radioactivity*. doi:10.1016/j.jenvrad.2013.05.003
- Korzhavyi P A, Johansson B, 2010.** Thermodynamic properties of copper compounds with oxygen and hydrogen from first principles. SKB TR-10-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Korzhavyi P A, Johansson B, 2011.** Literature review on the properties of cuprous oxide Cu₂O and the process of copper oxidation. SKB TR-11-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Korzhavyi P A, Johansson B, Lozovoi A Y, Alavi A, 2001.** Theoretical study of the grain boundary segregation in copper. (Segregation of 3_{sp} impurities to $\Sigma=5(310)$ tilt grain boundary in copper. I Nuclear waste containment materials. Papers related to the SKB waste disposal programme presented at the Materials Research Society Spring Meeting, April 19, 2001. SKB TR-01-25, Svensk Kärnbränslehantering AB, 33–49.
- Korzhavyi P A, Soroka I L, Boman M, Johansson B, 2011.** Thermodynamics of stable and metastable Cu-O-H compounds. *Solid State Phenomena* 172–174, 973–978.
- Korzhavyi P A, Soroka I L, Isaev E I, Lilja C, Johansson B, 2012.** Exploring monovalent copper compounds with oxygen and hydrogen. *Proceedings of National Academy of Sciences* 109, 686–689.
- Křibek B, Zák K, Dobeš P, Leichmann J, Pudilová M, René M, Scharm B, Scharmová M, Hájek A, Holeczy D, Hein U F, Lehmann B, 2009.** The Rožná uranium deposit (Bohemian Massif, Czech Republic): shear zone-hosted, late Variscan and post-Variscan hydrothermal mineralization. *Mineralium Deposita* 44, 99–128.
- Krishna R, Wesselingh J A, 1997.** The Maxwell-Stefan approach to mass transfer. *Chemical Engineering Science* 52, 861–911.
- Kritsky V G, Morozov V V, Nechaev A F, Khritov Y A, Petrik N G, Kalyazin N N, Makarchuk T F, 1987.** Material corrosion under spent nuclear nuclear fuel storage conditions. I Materials reliability in the back end of the nuclear fuel cycle: proceedings of a technical committee meeting on materials reliability in the back end of the nuclear fuel cycle organized by the International Atomic Energy Agency and held in Vienna, 2–5 September 1986. IAEA-TECDOC-421, International Atomic Energy Agency, 51–62.
- Kumblad L, Bradshaw C, 2008.** Element composition of biota, water and sediment in the Forsmark area, Baltic Sea. Concentrations, bioconcentration factors and partitioning coefficients (K_d) of 48 elements. SKB TR-08-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kumblad L, Kautsky U, 2004.** Effects of land-rise on the development of a coastal ecosystem of the Baltic Sea and its implementations for the long-term fate of ^{14}C discharges. *Hydrobiologia* 514, 185–196.
- Kumblad L, Gilek M, Næslund B, Kautsky U, 2003.** An ecosystem model of the environmental transport and fate of carbon-14 in a bay of the Baltic sea, Sweden. *Ecological Modelling* 166, 193–210.
- Kuron D, Gräfen H, Batroff H-P, Fäßler K, Münster R, 1985.** Einfluß des Chloridgehaltes in Trinkwasser auf die Korrosion von unlegiertem Stahl (Influence of chloride content in tap water on the corrosion of unalloyed steel). *Werkstoffe und Korrosion* 36, 68–79.
- Kärnavfallsrådet, 2011.** Kärnavfallsrådets yttrande över SKB:s Fud-program 2010: betänkande. Stockholm: Fritze. (Statens offentliga utredningar 2011:50)
- Laaksoharju M, Skårman C, Skårman E, 1999.** Multivariate mixing and mass-balance (M3) calculations, a new tool for decoding hydrogeochemical information. *Applied Geochemistry* 14, 861–871.
- Lambeck K, Purcell A, Zhao J, Svensson N, 2010.** The Scandinavian ice sheet: from MIS 4 to the end of the last glacial maximum. *Boreas* 39, 410–435.
- Lan H, Martin C D, Hu B, 2010.** Effect of heterogeneity of brittle rock on micromechanical extensile behavior during compression loading. *Journal of Geophysical Research* 115. doi:10.1029/2009JB006496
- Lan H, Martin C D, Andersson J C, 2013.** Evaluation of in situ rock mass damage induced by mechanical-thermal loading. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 46, 153–168.
- Landström O, Tullborg E-L, Eriksson G, Sandell Y, 2001.** Effects of glacial/postglacial weathering compared with hydrothermal alteration – implications for matrix diffusion. Results from drillcore studies in porphyritic quartz monzodiorite from Äspö SE Sweden. SKB R-01-37, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Larsson M, 2012.** Heterogeneity-induced channelling, flow-wetted surface, and modelling of transport in fractured rock. Doktorsavh. Uppsala universitet.
- Laudon H, Berggren M, Ågren A, Buffam I, Bishop K, Grabs T, Jansson M, Köhler S, 2011.** Patterns and dynamics of dissolved organic carbon (DOC) in boreal streams: the role of processes, connectivity, and scaling. *Ecosystems* 14, 880–893.
- Lever M A, 2012.** Acetogenesis in the energy-starved deep biosphere – a paradox? *Frontiers in Microbiology* 2. doi:10.3389/fmicb.2011.00284
- Lidman F, Mörth C-M, Björkvald L, Laudon H, 2011.** Selenium dynamics in boreal streams: the role of wetlands and changing groundwater tables. *Environmental Science & Technology* 45, 2677–2683.
- Lidman F, Mörth C M, Laudon H, 2012.** Landscape control of uranium and thorium in boreal streams: spatiotemporal variability and the role of wetlands. *Biogeosciences* 9, 4773–4785.

- Lidman F, Ramebäck H, Bengtsson Å, Laudon H, 2013.** Distribution and transport of radionuclides in a boreal mire – assessing past, present and future accumulation of uranium, thorium and radium. *Journal of Environmental Radioactivity* 121, 87–97.
- Lidskog R (red), 1998.** Kommunen och kärnavfallet: svensk kärnavfallspolitik på 1990-talet. Stockholm: Carlsson.
- Lim S S, Martin C D, Åkesson U, 2012.** In-situ stress and microcracking in granite cores with depth. *Engineering Geology* 147–148, 1–13.
- Limer L M C, Smith K, Albrecht A, Marang L, Norris S, Smith G M, Thorne M C, Xu S, 2012.** C-14 long-term dose assessment: data review, scenario development, and model comparison. Report 2012:47, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- Lindblom E, 2011.** Microearthquake study of end-glacial faults in northern Sweden. Licentiatavh. Uppsala universitet, Institutionen för geovetenskaper.
- Lindborg T (red), 2008.** Surface system Forsmark. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. SKB R-08-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lindborg T (red), 2010.** Landscape Forsmark – data, methodology and results for SR-Site. SKB TR-10-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lindborg T, Kautsky U, 2000.** Variabler i olika ekosystem, tänkbara att beskriva vid platsundersökning för ett djupförvar. SKB R-00-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lindborg T, Wijnbladh E, Kautsky U, 2006.** Surface system characterisation – a strategy to integrate biosphere descriptions. Proceedings of the 11th International High-Level Radioactive Waste Management Conference (IHLRWM 2006), Las Vegas, Nevada, 30 April – 4 May 2006. New York: American Nuclear Society.
- Lindborg T, Näslund J-O, Berglund S, 2010.** Integrating ice sheet, bedrock and surface systems in a periglacial environment by modeling water and chemical fluxes. Proceedings of the 3rd European Conference on Permafrost (EUCOP III), Svalbard, Norway, 13–17 June 2010. Abstract book.
- Lindborg T, Brydsten L, Näslund J-O, Kautsky U, 2012.** Landscape development in the safety assessment of a potential repository in Forsmark, Sweden. *Radioprotection* 46, S639–S645.
- Lindborg T, Brydsten L, Sohlenius G, Strömngren M, Andersson E, Löfgren A, 2013.** Landscape development during a glacial cycle: modeling ecosystems from the past into the future. *Ambio* 42, 402–413.
- Lindgren M, Pers K, Skagius K, Wiborgh M, Brodén K, Carlsson J, Riggare P, Skogsberg M, 1998.** Low and intermediate level waste in SFL3-5: Reference inventory. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lindgren M, Pettersson M, Karlsson S, Moreno L, 2001.** Project SAFE. Radionuclide release and dose from the SFR repository. SKB R-01-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lindgren U, Strömngren M, 2007.** Slutförvarets lokala effekter på befolkning och sysselsättning i Östhammar och Oskarshamn. SKB R-07-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lindman M, Lund B, Roberts R, 2010.** Spatiotemporal characteristics of aftershock sequences in the South Iceland seismic zone: interpretation in terms of pore pressure diffusion and poroelasticity. *Geophysical Journal International* 183, 1104–1118.
- Lindow V, 2012.** Ågesta rivningsstudie – Samlad bedömning och uppskattning av rivningskostnaden för Ågesta kraftvärmeverk. Dok.ID AE-NPR 2012-027 (PN-S 12-072), Vattenfall AB.
- Liu J, Zhou Z, Xu Z, Masliyah J, 2002.** Bitumen–clay interactions in aqueous media studied by zeta potential distribution measurement. *Journal of Colloid and Interface Science* 252, 409–418.
- Lorentz H, Pålsson P, 2012.** Avvecklingsplan för Barsebäcksverket. 1884576/6, BKAB, Sverige.
- Lousada C M, Trummer M, Jonsson M, 2013.** Reactivity of H₂O₂ towards different UO₂-based materials: the relative impact of radiolysis products revisited. *Journal of Nuclear Materials* 434, 434–439.
- Lund B, Schmidt P, Hieronymus C, 2009.** Stress evolution and fault stability during the Weichselian glacial cycle. SKB TR-09-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lund B, Schmidt P, Zoback M D, Näslund J-O, Munier R, 2011a.** Stress evolution and fault stability during the Weichselian glacial cycle with special focus on the Fennoscandian endglacial faults. *Geophysical Research Abstracts* 13, EGU2011-10399-4, EGU General Assembly 2011.
- Lund B, Schmidt P, Zoback M D, Näslund J-O, Munier R, 2011b.** Deglaciation generated intraplate earthquakes in Fennoscandia: why did they occur as the ice retreated, and why in the north and not in the south? AGU Fall meeting 2011. Abstract #T34C-08.

- Lund B, Schmidt P, Lindblom E, Näslund J-O, Juhlin C, 2012.** Postglacial intraplate earthquakes in Fennoscandia: what have we learned about the underlying mechanics from recent seismicity and GIA modelling? DynaQlim – Workshop on Lithosphere–Cryosphere Interactions, Ruhr-Universität Bochum, 26–27 September 2012.
- Lundqvist J, 2011.** Sveriges geologi från urtid till nutid. 3. uppl. Lund: Studentlitteratur.
- Luping T, Bager D H, 2013.** A study of consequences of freezing of concrete structures for storage of nuclear waste due to permafrost. SKB TR-12-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Luterkort D, Gylling B, Johansson R, 2012.** Closure of the Spent Fuel Repository in Forsmark. Studies of alternative concepts for sealing of ramp, shafts and investigation boreholes. SKB TR-12-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lydmark S, Hallbeck L, 2011.** Results report. Sampling and analyses of gases and microorganisms in the water from MINICAN in 2007, 2008 and 2010. SKB P-11-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lysell G, 2013.** Ny nationell höjdmödel, NNH. Nyhetsbrev 2013:1, Lantmäteriet.
- Löfgren A (red), 2010.** The terrestrial ecosystems at Forsmark and Laxemar-Simpevarp. SR-Site Biosphere. SKB TR-10-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Löfgren A, 2011.** Dissolved inorganic carbon and organic carbon in mires in the Forsmark area. A pilot study. SKB P-11-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Löfgren M, Neretnieks I, 2006.** Through-electromigration: a new method of investigating pore connectivity and obtaining formation factors. *Journal of Contaminant Hydrology* 87, 237–252.
- Löfgren M, Sidborn M, 2010a.** Statistical analysis of results from the quantitative mapping of fracture minerals in Forsmark. Site descriptive modelling – complementary studies. SKB R-09-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Löfgren M, Sidborn M, 2010b.** Statistical analysis of results from the quantitative mapping of fracture minerals in Laxemar. Site descriptive modelling – complementary studies. SKB R-09-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Löfgren M, Vecernic P, Havlova V, 2009.** Studying the influence of pore water electrical conductivity on the formation factor, as estimated based on electrical methods. SKB R-09-57, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lönnqvist M, Hökmark H, 2010.** Assessment of potential for glacially induced hydraulic jacking at different depths. SKB R-09-35, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lönnqvist M, Kristensson O, Fälth B, 2010.** Assessment of a KBS-3 nuclear waste repository as a plane of weakness. SKB R-10-36, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Magnusson H, Frisk K, 2013.** Thermodynamic evaluation of Cu-H-O-S-P system. Phase stabilities and solubilities for OFP-copper. SKB TR-13-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Magnusson Å, Stenström K, Aronsson P-O, 2007.** Characterization of ¹⁴C in process water systems, spent resins and off-gas of Swedish LWRs. Internal Report LUNFD6/(NFFR-3102)/1-81/(2007) Lund University, Department of Physics, Division of Nuclear Physics.
- Mahmoudzadeh B, Liu L, Moreno L, Neretnieks I, 2012.** Solute transport in fractured rocks with stagnant water zone and rock matrix composed of different geological layers – model development and simulations. *Water Resources Research* 49, 1709–1727.
- Malm R, 2012.** Low-pH concrete plug for sealing the KBS-3V deposition tunnels. SKB R-11-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Malmberg D, Kristensson O, 2013.** Thermo-hydraulic modeling of the Prototype Repository with main focus on the bentonite buffer. I Proceedings of the 5th meeting on “Clays in natural and engineered barrier for radioactive waste confinement”, Montpellier, 22–25 October 2012. Geological Society Special Publication (to be published).
- Mannesson K, Andersson-Östling H, Sandström R, 2013.** Influence of local cold work in creep failure of phosphorus doped oxygen free copper. SKB R-13-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Marsic N, Grundfelt B, 2013a.** Modelling of thermally driven groundwater flow in a facility for disposal of spent nuclear fuel in deep boreholes. SKB P-13-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Marsic N, Grundfelt B, 2013b.** Review of geoscientific data of relevance to disposal of spent nuclear fuel in deep boreholes in crystalline rock. SKB P-13-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Marsic N, Grundfelt B, Wiborgh M, 2006.** Very deep hole concept. Thermal effects on groundwater flow. SKB R-06-59, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Martin D, Follin S, 2011.** Review of possible correlations between in situ stress and PFL fracture transmissivity data at Forsmark. SKB R-08-69, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Martin D, Ericsson L O, Christiansson R, Andersson J A, 2010.** A comparison of the normal stress and hydraulic conductivity coupling for fractures in the laboratory and in-situ. I Proceedings of 44th U.S. Rock Mechanics Symposium and 5th U.S./Canada Rock Mechanics Symposium, Salt Lake City, Utah, 27–30 June 2010. American Rock Mechanics Association.
- Martinsson Å, Sandström R, 2012.** Hydrogen depth profile in phosphorus-doped oxygen-free copper after cathodic charging. *Journal of Material Science* 47, 6768–6776.
- Martinsson Å, Andersson-Östling H C M, Seitisleam F, Wu R, Sandström R, 2010.** Creep testing of nodular iron at ambient and elevated temperatures. SKB R-10-64, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Martinsson Å, Sandström R, Lilja C, 2013.** Hydrogen in oxygen-free, phosphorous-doped copper: charging techniques, hydrogen contents and modelling of hydrogen diffusion and depth profile. SKB TR-13-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Mas Ivars D, Hakami H, 2005.** Effect of a sub-horizontal fracture zone and rock mass heterogeneity on the stress field in Forsmark area – a numerical study using 3DEC. Preliminary site description. Forsmark area – version 1.2. SKB R-05-59, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Mathurin F A, Åström M E, Laaksoharju M, Kalinowski B E, Tullborg E-L, 2012.** Effect of tunnel excavation on source and mixing of groundwater in a coastal granitoidic fracture network. *Environmental Science & Technology* 46, 12779–12786.
- Mazeina L, Ushakov S V, Navrotsky A, Boatner L A, 2005.** Formation enthalpy of ThSiO₄ and enthalpy of the thorite → huttonite phase transition. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69, 4675–4683.
- McMurry J, Bertetti F P, 2012.** Review of groundwater chemistry in SKB's safety assessment SR-Site: Initial review. Technical Note 2012:33, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- McNeil M B, Little B J, 1992.** Corrosion mechanisms for copper and silver objects in near-surface environments. *Journal of the American Institute for Conservation* 31, 355–366.
- Mercadier J, Cuney M, Cathelineau M, Lacorde M, 2011.** U redox fronts and kaolinisation in basement-hosted unconformity-related U ores of the Athabasca Basin (Canada): late U remobilisation by meteoritic fluids. *Mineralium Deposita* 46, 105–135.
- Mihara M, Nishimura T, Wada R, Honda A, 2002.** Estimation on gas generation and corrosion rates of carbon steel, stainless steel and zircaloy in alkaline solutions under low oxygen condition. *Saikuru Kiko Giho* 15, 91–101. (På japanska.)
- Milodowski A E, Cave M R, Kemp S J, Taylor H, Vickers B P, Green K A, Williams C L, Shaw R A, 2009.** Mineralogical investigations of the interaction between iron corrosion products and bentonite from the NF-PRO Experiments (Phase 1). SKB TR-09-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Min M, Fang C, Fayek M, 2005.** Petrography and genetic history of coffinite and uraninite from the Liueyiqi granite-hosted uranium deposit, SE China. *Ore Geology Reviews* 26, 187–197.
- Morén L, Wikström M, 2007.** Systematisk kravhantering för KBS-3-systemet. SKB R-07-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Moreno L, Neretnieks I, Liu L, 2010.** Modelling of erosion of bentonite gel by gel/sol flow. SKB TR-10-64, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Moreno L, Skagius K, Södergren S, Wiborgh M, 2001.** Project SAFE. Gas related processes in SFR. SKB R-01-11, Svensk kärnbränslehantering AB.
- Munier R, 2010.** Full perimeter intersection criteria. Definitions and implementations in SR-Site. SKB TR-10-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Munier R, Hökmark H, 2004.** Respect distances. Rationale and means of computation. SKB R-04-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Mårtensson E, Gustafsson L-G, 2010.** Hydrological and hydrogeological effects of an open repository in Forsmark. Final MIKE SHE flow modelling results for the Environmental Impact Assessment. SKB R-10-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Mårtensson E, Gustafsson L-G, Gustafsson A-M, Aneljung M, Sabel U, 2010.** Hydrologiska och hydrogeologiska effekter på våtmarker och skogsområden av slutförvarsanläggningen i Forsmark. Resultat från modellering med MIKE SHE. SKB R-10-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Möller K, 2012.** Korrosion av koppar i syrefritt vatten. SKB R-12-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Naish C C, Blackwood D J, Thomas M I, Rance A P, 2001.** The anaerobic corrosion of carbon steel and stainless steel. Report AEAT/ENV/0224, AEA Technology.

- NEA, 2004.** Post-closure safety case for geological repositories: nature and purpose. NEA Report 3679. Paris: Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development.
- NEA, 2012.** The post-closure radiological safety case for a spent fuel repository in Sweden: an international peer review of the SKB license-application study of March 2011. Paris: Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Neretnieks I, 2013.** Some aspects of release and transport of gases in deep granitic rocks: possible implications for nuclear waste repositories. *Hydrogeology Journal*. doi:10.1007/s10040-013-0986-z
- Neretnieks I, Andersson J C, 2009.** Characterisation of spalling fragments to obtain data for flow and transport in damaged zones. I Proceedings of the ISRM-Sponsored international symposium on rock mechanics: "Rock characterisation, modelling and engineering design methods" (SINOROCK 2009) held at the University of Hong Kong, China, 19–22 May 2009.
- Neretnieks I, Ernstson M-L, 1997.** A note on radionuclide transport by gas bubbles. I Gray W J, Triay I R (red). Scientific basis for nuclear waste management XX: symposium held in Boston, Massachusetts, USA, 2–6 December 1996. Pittsburgh, PA: Materials Research Society. (Materials Research Society Symposium Proceedings 465), 855–862.
- Nicot J-P, 2008.** Methodology for bounding calculations of nuclear criticality of fissile material accumulations external to a waste container at Yucca Mountain, Nevada. *Applied Geochemistry* 23, 2065–2081.
- Nicksiar M, Martin C D, 2012.** Crack initiation stress in low porosity crystalline and sedimentary rocks. *Engineering Geology* 154, 64–76.
- Nielsen A B, 2010.** Present conditions in Greenland and the Kangerlussuaq area. Posiva Working Report 2010-07, Posiva Oy, Finland.
- Nilsson A-C, Tullborg E-L, Smellie J, 2010.** Preliminary hydrogeochemical site description SFR (version 0.2). SKB R-10-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Nilsson A-C, Tullborg E-L, Smellie S, Gimeno M, Gómez J, Aqué L, Sandström B, Pedersen K, 2011.** SFR site investigation. Bedrock hydrogeochemistry. SKB R-11-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Nilsson K, Byegård J, Selnert E, Widestrand H, 2010.** Äspö Hard Rock Laboratory. Long Term Sorption Diffusion Experiment (LTDE-SD). Results from rock sample analyses and modelling. SKB R-10-68, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Nilsson S, Jonsson M, 2011.** H₂O₂ and radiation induced dissolution of UO₂ and SIMFUEL pellets. *Journal of Nuclear Materials* 410, 89–93.
- Nord L, Stúr E, 2010.** Från ödesfråga till övrig fråga. En studie av den politiska debatten om kärnavfallet i Sverige 1976–2009. SKB R-10-56, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Nordén S, Avila R, Stenberg K, Grolander S, 2010.** Element-specific and constant parameters used for dose calculations in SR-Site. SKB TR-10-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Nordqvist R, Hjerne C, Andersson P, 2012.** Single-well and large-scale cross-hole tracer experiments in fractured rocks at two sites in Sweden. *Hydrogeology Journal* 20, 519–531.
- Nordström E, 2009.** Fission gas release data for Ringhals PWRs. SKB TR-09-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Norman S, Kjellbert N, 1990.** FARF31 – A far field radionuclide migration code for use with the PROPER package. SKB TR 90-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Näslund J-O, Brandefelt J, Claesson Liljedahl L, 2013.** Climate considerations in long-term safety assessments for nuclear waste repositories. *Ambio* 42, 393–401.
- Odén A, 2013.** Förutsättningar för borrning av och deponering i djupa borrhål. SKB P-13-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- OECD/NEA, 2011.** Preservation of records, knowledge and memory (RK&M) across generations. Tillgänglig: <http://www.oecd-nea.org/rwm/rkm> [2013-02-25].
- OECD/NEA, IAEA, EC, 2012.** International structure for decommissioning costing (ISDC) of nuclear installation. Issy-les-Moulineaux: OECD Nuclear Energy Agency.
- OKG, 2013.** Avvecklingsplan för framtida avveckling av anläggningarna. 2005-13693, OKG, Sverige.
- Oldberg K, 2009.** Distribution of fission gas release in 10×10 fuel. SKB TR-09-25, Svensk Kärnbränslehantering AB
- Olsson M, Markström I, Pettersson A, 2008.** Methodology study for documentation and 3D modelling of blast induced fractures. SKB R-08-90, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Olsson M, Markström I, Pettersson A, Sträng M, 2009.** Examination of the Excavation Damaged Zone in the TASS tunnel, Äspö HRL. SKB R-09-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Olvmo M, 2010.** Review of denudation processes and quantification of weathering and erosion rates at a 0.1 to 1 Ma time scale. SKB TR-09-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Painter S, Mancillas J, 2009.** MARFA version 3.2.2 user's manual: migration analysis of radionuclides in the far field. SKB R-09-56, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pakarinen J, 2011.** (S)TEM analysis of OFP copper CT-tested in S containing groundwater. Research Report VTT-R-04957-11, VTT, Finland.
- Parkhurst D L, Appelo C A J, 1999.** User's guide to PHREEQC (version 2): a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Water-Resources Investigations Report 99-4259, U.S. Geological Survey, Denver, Colorado.
- Pastina B, LaVerne J A, 2001.** Effect of molecular hydrogen on hydrogen peroxide in water radiolysis. *The Journal of the Physical Chemistry A* 105, 9316–9322.
- Paul R, 2013.** Comparative analysis of Swedish decommissioning studies. 9160/ CA / F 007032 6 / 00, NIS Ingenieurgesellschaft mbH, Tyskland.
- Pedersen K, 2001.** Project SAFE. Microbial features, events and processes in the Swedish final repository for low- and intermediate-level radioactive waste. SKB R-01-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pedersen K, 2002.** Microbial processes in the disposal of high level radioactive waste 500 m underground in Fennoscandian shield rocks. I Keith-Roach M J, Livens F R (red). *Interactions of microorganisms with radionuclides*. Amsterdam: Elsevier, 279–311.
- Pedersen K, 2012a.** Subterranean microbial populations metabolize hydrogen and acetate under in situ conditions in granitic groundwater at 450 m depth in the Äspö Hard Rock Laboratory, Sweden. *FEMS Microbiology Ecology* 81, 217–229.
- Pedersen K, 2012b.** Influence of H₂ and O₂ on sulphate-reducing activity of a subterranean community and the coupled response in redox potential. *FEMS Microbiology Ecology* 82, 653–665.
- Pedersen K, 2012c.** Metabolic activity of subterranean microbial communities in deep granitic groundwater supplemented with methane and H₂. *The ISME Journal* 7, 839–849.
- Pehrman R, Amme M, Roth O, Ekeröth E, Jonsson M, 2010.** Oxidative dissolution of actinide oxides in H₂O₂ containing aqueous solution – a preliminary study. *Journal of Nuclear Materials* 397, 128–131.
- Peltier W R, 2004.** Global glacial isostasy and the surface of the ice-age Earth: the ICE-5G (VM2) model and GRACE. *Annual Review of Earth and Planetary Science* 32, 111–149. Perronnet M, Jullien M, Villieras F, Raynal J, Bonnin D, Bruno G, 2008. Evidence of a critical content in Fe(0) on FoCa7 bentonite reactivity at 80 °C. *Applied Clay Science* 38, 187–202.
- Persson J, Lydmark S, Edlund J, Pääjärvi A, Pedersen K, 2011.** Microbial incidence on copper nad titanium embedded in compacted bentonite clay. SKB R-11-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Persson K, 2011.** Quantifying pollutant spreading and the risk of water pollution in hydrological catchments: a solute travel time-based scenario approach. Doktorsavh. Stockholms universitet, Institutionen för naturgeografi och kvartärgeologi.
- Persson K, Jarsjö J, Destouni G, 2011.** Diffuse hydrological mass transport through catchments: scenario analysis of coupled physical and biogeochemical uncertainty effects. *Hydrology and Earth System Sciences* 15, 3195–3206.
- Petersen Y M, Rost H B, 2011.** Swedish Lidar project: new nationwide elevation model. *GIM International* 25, 20–24.
- Pettersson A, Thunberg S, 2012.** Kringgjutning av medelaktivt avfall: en experimentell studie av kringgjutning med betongbruk i 1BMA med fokus på arbetbarhet och reologi. Examensarbete. Lunds Tekniska Högskola.
- Pettersson K, 2010.** A study of grain boundary sliding in copper with and without an addition of phosphorous. *Journal of Nuclear Materials* 405, 131–137.
- Pettersson M, Elert M, 2001.** Characterisation of bitumenised waste in SFR 1. SKB R-01-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pettersson T, 2008.** Unga sjunga med de gamla! En jämförande analys av grundläggande värderingar och uppfattningar om demokrati och politik bland blivande vuxna från 24 länder. SKB R-08-53, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Piqué À, Grandia F, Sena C, Arcos D, Molinero J, Duro L, Bruno J, 2010.** Conceptual and numerical modelling of radionuclide transport in near-surface systems at Forsmark. SR-Site Biosphere. SKB R-10-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Piqué A, Arcos D, Grandia F, Molinero J, Duro L, Berglund S, 2013a.** Conceptual and numerical modeling of radionuclide transport and retention in near-surface systems. *Ambio* 42, 476–487.
- Piqué A, Pekala M, Molinero J, Duro L, Trincherro P, de Vries L M, 2013b.** Updated model for radionuclide transport in the near-surface till at Forsmark. Implementation of decay chains and sensitivity analyses. SKB R-13-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pointeau V, Deditius A P, Miserque F, Renock D, Becker U, Zhang J, Clavier N, Dacheux N, Poinssot C, Ewing R C, 2009.** Synthesis and characterization of coffinite. *Journal of Nuclear Materials* 393, 449–458.
- Potyondy D O, 2007.** Simulating stress corrosion with a bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 44, 677–691.
- Puranen A, Jonsson M, Dähn R, Cui D, 2010a.** Reduction of selenite and selenate on anoxically corroded iron and the synergistic effect of uranyl reduction. *Journal of Nuclear Materials* 406, 230–237.
- Puranen A, Jansson M, Jonsson M, 2010b.** A study on the immobilization of selenium oxyanions by H₂/Pd(s) in aqueous solution: confirmation of the one-electron reduction barrier of selenate. *Journal of Contaminant Hydrology* 111, 16–23.
- Puranen A, Ekeröth E, Granfors M, Low J, Spahiu K, 2012.** Assessing the role of spent fuel surfaces during leaching in presence of hydrogen by using Cr(VI) as a redox marker. I Scientific basis for nuclear waste management XXXV. Warrendale, PA: Materials Research Society. (Materials Research Society Symposium Proceedings 1475), 77–82.
- Pusch R, 1985.** Buffertar av bentonitbaserade material i siloförvaret. Funktion och utförande. SKB SFR 85-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pusch R, 2003.** Design, construction and performance of the clay-based isolation of the SFR silo. SKB R-03-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pusch R, Ramqvist G, 2011.** Interaction of clay and concrete plugs – Plugging of a 5 m deep hole KA1621G01 at Äspö. Final report. SKB R-11-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pusch R, Karnland O, Lajudie A, Decarreau A, 1993.** MX 80 clay exposed to high temperatures and gamma radiation. SKB TR 93-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pusch R, Kasbohm J, Thao H T M, 2010.** Chemical stability of montmorillonite buffer clay under repository-like conditions – A synthesis of relevant experimental data. *Applied Clay Science* 47, 113–119.
- Pöllönen J, Heikkinen P, Lehtinen A, 2012.** Difference flow measurements in Greenland, drillhole DH-GAP04 in July 2011. Posiva Working Report 2012-13, Posiva Oy, Finland.
- Qvarfordt S, Borgiel M, Berg C, 2010.** Monitoring Forsmark. Hydrochemical investigations in four calciferous lakes in the Forsmark area. Results from complementary investigations in the Forsmark area, 2008–2009. SKB P-10-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Qvarfordt S, Borgiel M, Berg C, 2011.** Forsmark site investigation. Hydrochemical investigations in four calciferous lakes in the Forsmark area. Results from the second year of a complementary investigation in the Forsmark area. SKB P-11-47, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Rabung T, Molinero J, Garcia D, Montoya V (red), 2012.** 1st Workshop Proceedings of the Collaborative Project “Crystalline Rock Retention Processes” (7th EC FP CP CROCK) Stockholm, 22–24 May 2012. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.
- Raguž V, Jarsjö J, Grolander S, Lindborg R, Avila R, 2013.** Plant uptake of elements in soil and pore water: field observations versus model assumptions. *Journal of Environmental Management* 126, 147–156.
- Rahman M, 2013.** In-line rheology of cement grouts: feasibility study of an ultrasonic based non-invasive method. Licentiatavh. Kungliga Tekniska högskolan, Skolan för arkitektur och samhällsbyggnad.
- Raiko H, Sandström R, Rydén H, Johansson M, 2010.** Design analysis report for the canister. SKB TR-10-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Razumovskiy V I, Ruban A V, Korzhavyi P A, 2011a.** First-principles study of elastic properties of Cr- and Fe-rich Fe-Cr alloys. *Physical Review B* 84, 024106. doi:10.1103/PhysRevB.84.024106
- Razumovskiy V I, Ruban A V, Korzhavyi P A, 2011b.** Effect of temperature on the elastic anisotropy of pure Fe and Fe_{0.9}Cr_{0.1} random alloy. *Physical Review Letters* 107, 205504. doi: 10.1103/PhysRevLett.107.205504
- Regeringsbeslut 2011-10-27.** Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall. Regeringsbeslut I:15, Miljödepartementet.
- Reynaud A, 2009.** Corrosion of cast irons. I Richardson T J A (red) Shreir’s corrosion. 4th ed. Volume 3: Corrosion and degradation of engineering materials. Amsterdam: Elsevier, 1737–1788.
- Riis F, 1996.** Quantification of Cenozoic vertical movements of Scandinavia by correlation of morphological surfaces with offshore data. *Global and Planetary Change* 12, 331–357.

- Roos P, Engdahl A, Karlsson S, 2007.** Oskarshamn and Forsmark site investigations. Analysis of radioisotopes in environmental samples. SKB P-07-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Rosborg B, 2013a.** Recorded corrosion rates on copper electrodes in the Prototype Repository at the Äspö HRL. SKB R-13-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Rosborg B, 2013b.** Post-test examination of a copper electrode from deposition hole 5 in the Prototype Repository. SKB R-13-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Rosborg B, Kranjc A, Kuhar V, Legat A, 2011a.** Corrosion rate of pure copper in an oxic bentonite/saline groundwater environment. *Corrosion Engineering, Science and Technology* 46, 148–152.
- Rosborg B, Kosec T, Kranjc A, Pan J, Legat A, 2011b.** Electrochemical impedance spectroscopy of pure copper exposed in bentonite under oxic conditions. *Electrochimica Acta* 56, 7862–7870.
- Rosborg B, Kosec T, Kranjc A, Kuhar V, Legat A, 2012.** The corrosion rate of copper in a bentonite test package measured with electric resistance sensors. SKB R-13-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Rosdahl A, Pedersen K, Hallbeck L, Wallin B, 2011.** Investigation of sulphide in core drilled boreholes KLX06, KAS03 and KAS09 at Laxemar and Äspö. Chemical-, microbiological- and dissolved gas data from groundwater in four borehole sections. SKB P-10-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Rutqvist J, Tsang C-F, 2008.** Review of SKB's work on coupled THM processes within SR-Can. External review contribution in support of SKI's and SSI's review of SR-Can. SKI Report 2008:08, Statens kärnkraftinspektion.
- Ryan J N, Elimelech M, 1996.** Colloid mobilization and transport in groundwater. *Colloids and Surfaces A* 107, 1–56.
- Rüedi J, 2010.** LCS Setup of field experiments. Nagra Arbeitsbericht NAB 10-05, Nagra, Schweiz.
- Rüedi J, Mäder U, Kontar K, Leeman A, Nakashima S, Sasamoto H, Walker C, Soler J, 2012.** LCS – Overcoring and analyses of borehole LCS06-001. Nagra Arbeitsbericht NAB 12-25, Nagra, Schweiz.
- Rögnvaldsson S T, Slunga R, 1993.** Routine fault plane solutions for local networks; a test with synthetic data. *Bulletin of the Seismological Society of America* 83, 1232–1247.
- Saetre P, Valentin J, Lagerås P, Avila R, Kautsky U, 2013.** Land use and food intake of future inhabitants: outlining a representative individual of the most exposed group for dose assessment. *Ambio* 42, 488–496.
- Salas J, Gimeno M J, Auqué L, Molinero J, Gómez J, Juárez I, 2010.** SR-Site – hydrogeochemical evolution of the Forsmark site. SKB TR-10-58, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Salonen J S, Helmens K F, Seppä H, Birks H J B, 2013.** Pollen-based palaeoclimate reconstructions over long glacial–interglacial timescales: methodological tests based on the Holocene and MIS 5d–c deposits at Sokli, northern Finland. *Journal of Quaternary Science* 28, 271–282.
- Sandberg M, 2008.** Ungdomars syn på kärnkraft och demokrati sedan 1980-talet. Attitydepidemier, stigberoenden och teknisk-politisk kulturrevolution. SKB R-08-52, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sandén T, Börgesson L, 2010.** Early effects of water inflow into a deposition hole. Laboratory tests results. SKB R-10-70, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sandström B, Tullborg E-L, 2011.** Site investigation SFR. Fracture mineralogy and geochemistry of borehole sections sampled for groundwater chemistry and Eh. Results from boreholes KFR01, KFR08, KFR10, KFR19, KFR7A and KFR105. SKB P-11-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sandström B, Nilsson K, Tullborg E-L, 2011.** Site investigation SFR. Fracture mineralogy including identification of uranium phases and hydrochemical characterisation of groundwater in borehole KFR106. SKB P-11-41, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sandström R, 2012.** Basic model for primary and secondary creep in copper. *Acta Materialia* 60, 314–322.
- Sandström R, Andersson H C M, 2008.** Creep in phosphorus alloyed copper during power-law breakdown. *Journal of Nuclear Materials* 372, 76–88.
- Sandström R, Hallgren J, 2009.** Stress strain flow curves for Cu-OFP. SKB R-09-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sandström R, Hallgren J, 2012.** The role of creep in stress strain curves for copper. *Journal of Nuclear Materials* 422, 51–57.
- Sandström R, Wu R, 2007.** Origin of the extra low creep ductility of copper without phosphorus. SKB TR-07-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sandström R, Wu R, 2013.** Influence of phosphorus on the creep ductility of copper. *Journal of Nuclear Materials* 441, 364–371.

- Sandström R, Östling H, Jin L-Z, 2013.** Modelling of creep in friction stir welded copper. *Materials Research Innovations* 17, 350–354.
- Sassner M, Sabel U, Bosson E, Berglund S, 2011.** Numerical modelling of present and future hydrology at Laxemar-Simpevarp. SKB R-11-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Schenk R, 1988.** Untersuchungen über die Wasserstoffbildung Durch Eisenkorrosion unter Endlagerbedingungen. Technischer Bericht 86-24, Nagra, Schweiz.
- Schmidt P, Lund B, Hieronymus C, Näslund J-O, 2010.** 3D GIA-modelling of northern Europe with varying lithospheric thickness. *Geophysical Research Abstracts* 12, EGU2010-8802-2, EGU General Assembly 2010.
- Schrader H, 2004.** Half-life measurements with ionization chambers – a study of systematic effects and results. *Applied Radiation and Isotopes* 60, 317–323.
- Schrader H, 2010.** Half-life measurements of long-lived radionuclides – new data analysis and systematic effects. *Applied Radiation and Isotopes* 68, 1583–1590.
- SDDP, 2013a.** Collisional orogeny in the Scandinavian Caledonides (COSC). Tillgänglig: <http://www.sddp.se/COSC>
- SDDP, 2013b.** Drilling Active Faults in Northern Europe (DAFNE). Tillgänglig: <http://www.sddp.se/DAFNE>
- Selroos J-O, Follin S, 2010.** SR-Site groundwater flow modelling methodology, setup and results. SKB R-09-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Selroos J-O, Painter S L, 2012.** Effect of transport-pathway simplifications on projected releases of radionuclides from a nuclear waste repository (Sweden). *Hydrogeology Journal* 20, 1467–1481.
- Selroos J-O, Cheng H, Painter S, Vidstrand P, 2012.** Radionuclide transport during glacial cycles: Comparison of two approaches for representing flow transients. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. doi: 10.1016/j.pce.2012.10.003
- SFS 1984:3.** Lag om kärnteknisk verksamhet. Stockholm: Riksdagen.
- SFS 2006:647.** Lag om finansiella åtgärder för hanteringen av restprodukter från kärnteknisk verksamhet. Stockholm: Riksdagen.
- Shala S, Jansson K N, Helmens K F, Kylander M, Risberg J, Löwemark L, 2013.** Glacial lake evolution during the Late Glacial – Holocene transition at Sokli (northern Finland): a multi-proxy approach. *Boreas*. (Under utgivning.)
- Shapiro A M, Cvetkovic V D, 1988.** Stochastic analysis of solute arrival time in heterogeneous porous media. *Water Resources Research* 24, 1711–1718.
- Sheppard S, Long J, Sanipelli B, Sohlenius G, 2009.** Solid/liquid partition coefficients (K_d) for selected soils and sediments at Forsmark and Laxemar-Simpevarp. SKB R-09-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sheppard S, Sohlenius G, Omberg L-G, Borgiel M, Grolander S, Nordén S, 2011.** Solid/liquid partition coefficients (K_d) and plant/soil concentration ratios (CR) for selected soils, tills and sediments at Forsmark. SKB R-11-24, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sidborn M, Sandström B, Tullborg E-L, Salas J, Maia F, Delos A, Molinero J, Hallbeck L, Pedersen K, 2010.** SR-Site: Oxygen ingress in the rock at Forsmark during a glacial cycle. SKB TR-10-57, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Simmons C S, Ginn T R, Wood B D, 1995.** Stochastic-convective transport with nonlinear reaction: mathematical framework. *Water Resources Research* 31, 2675–2688.
- Simpson J P, Weber J, 1988.** Hydrogen evolution from corrosion in nuclear waste repositories. I U.K. Corrosion '88 with EUROCOR, Brighton, 3–5 October 1988. Vol 2. Institution of Corrosion Science and Technology, 33–46.
- Simpson J P, Schenk R, Knecht B, 1985.** Corrosion rate of unalloyed steels and cast irons in reducing granitic groundwaters and chloride solutions. I Werme L O (red). Scientific basis for nuclear waste management IX: symposium held in Stockholm, Sweden, 9–11 September 1985. Pittsburgh, PA: Materials Research Society. (Materials Research Society Symposium Proceedings 50), 429–436.
- Siren T, 2011.** Fracture mechanics prediction for Posiva's Olkiluoto Spalling Experiment (POSE). Posiva Working Report 2011-23, Posiva Oy, Finland.
- SIS, 2004.** SS-EN ISO 9692-1:2004: Svetsning och besläktade förfaranden – Rekommendationer för svetsfogar – Del 1: Manuell metallbågsvetsning, gasmetallbågsvetsning, gassvetsning, TIG-svetsning och strålsvetsning av stål (ISO 9692-1:2003). Stockholm: Swedish Standards Institute.
- SIS, 2005.** SS-EN 1997-1:2005: Eurokod 7: Dimensionering av geokonstruktioner – Del 1: Allmänna regler. Stockholm: Swedish Standards Institute.

- SIS, 2006.** SS-EN 1998-4:2006: Eurokod 8: Dimensionering av bärverk med avseende på jordbävning – Del 4: Silor, behållare och rörledningar. Stockholm: Swedish Standards Institute.
- SIS, 2010.** SS-EN 1990: Eurokod – Grundläggande dimensioneringsregler för bärverk. Stockholm: Swedish Standards Institute.
- Sjöberg L, 2006.** Opinion och attityder till förvaring av använt kärnbränsle. SKB R-06-97, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sjöberg L, 2008.** Attityd till slutförvar av använt kärnbränsle. Struktur och orsaker. SKB R-08-119, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Skalny J, Marchand J, Odler I, 2002.** Sulphate attack on concrete. New York: Spon Press.
- SKB, 1992.** PASS – Projekt AlternativStudier för Slutförvar. Slutrapport. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 1999.** Djupförvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall. Preliminär säkerhetsanalys. SKB R-99-59, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2000a.** Systemanalys. Val av strategi och system för omhändertagande av använt kärnbränsle. R-00-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2000b.** Förvarsalternativet djupa borrhål. Innehåll och omfattning av Fud-program som krävs för jämförelse med KBS-3-metoden. SKB R-00-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2002.** DRAAK, version 1.07p. Stockholm, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2004.** Struktur på avvecklingsplan för kärntekniska anläggningar, ”guideline”. SKB R-04-43, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2005.** Samhällsforskning 2005. Betydelsen för människorna, hembygden och regionen av ett slutförvar för använt kärnbränsle. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2006a.** Measurements of decay heat in spent nuclear fuel at the Swedish interim storage facility, Clab. SKB R-05-62, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2006b.** Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main report of the SR-Can project. SKB TR-06-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2006c.** Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2006d.** Fuel and canister process report for the safety assesment SR-Can. SKB TR-06-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2006e.** Geosphere process report for the safety assesment SR-Can. SKB TR-06-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2006f.** Buffer and backfill process report for the safety assesment SR-Can. SKB TR-06-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2006g.** Samhällsforskning 2006. Betydelsen för människorna, hembygden och regionen av ett slutförvar för använt kärnbränsle. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2007a.** Forsmark site investigation. Programme for long-term observations of geosphere and biosphere after completed site investigations. SKB R-07-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2007b.** Samhällsforskning 2007. Betydelsen för människorna, hembygden och regionen av ett slutförvar för använt kärnbränsle. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2008a.** Safety analysis SFR 1. Long-term safety. SKB R-08-130, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2008b.** Säkerhetsredovisning SFR 1. Allmän del 2 – Långsiktig säkerhet. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2008c.** Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase. SDM-Site Forsmark. SKB TR-08-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2008d.** Samhällsforskning 2008. Betydelsen för människorna, hembygden och regionen av ett slutförvar för använt kärnbränsle. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2009a.** Design premises for a KBS-3V repository based on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses. SKB TR-09-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2009b.** Underground design Forsmark. Layout D2. SKB R-08-116, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2009c.** Site description of Laxemar at completion of the site investigation phase. SDM-Site Laxemar. SKB TR-09-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2009d.** Samhällsforskning 2009. Betydelsen för människorna, hembygden och regionen av ett slutförvar för använt kärnbränsle. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2009e. Samhällsforskningen 2004–2009. Teman, resultat och reflektioner. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010a. Metodval – utvärdering av strategier och system för att ta hand om använt kärnbränsle. SKB R-10-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010b. Triumf NG Next Generation, version 1.0.1.3. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010c. Design and production of the KBS-3 repository. SKB TR-10-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010d. Spent nuclear fuel for disposal in the KBS-3 repository. SKB TR-10-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010e. Design, production and initial state of the canister. SKB TR-10-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010f. Design, production and initial state of the buffer. SKB TR-10-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010g. Design, production and initial state of the backfill and plug in deposition tunnels. SKB TR-10-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010h. Design, production and initial state of the closure. SKB TR-10-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010i. Design, construction and initial state of the underground openings. SKB TR-10-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010j. Ramprogram för detaljundersökningar vid uppförande och drift av slutförvar för använt kärnbränsle. SKB R-10-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010k. Radionuclide transport report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-50, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010m. Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-47, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010n. The Greenland Analogue Project. Yearly report 2009. SKB R-10-59, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010o. Fuel and canister process report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-46, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010p. Corrosion calculations report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-66, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010q. Data report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-52, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010r. Geosphere process report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010s. Comparative analysis of safety related site characteristics. SKB TR-10-54, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010t. Biosphere analyses for the safety assessment SR-Site – synthesis and summary of results. SKB TR-10-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010u. Components, processes and interactions in the biosphere. SKB R-10-37, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010v. Samhällsforskning 2010. Betydelsen för människorna, hembygden och regionen av ett slutförvar för använt kärnbränsle. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010w. Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-49, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB 2011a. SKB:s ansökan om slutförvar enligt kärntekniklagen. SSM, diarienummer SSM2011-1135. TPP (Tillståndsprövningsprojektet) Ansökan enligt kärntekniklagen om slutförvaring av använt kärnbränsle. Tillgänglig: <http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/start/slutforvar/Ansokningarna/>

SKB 2011b. Ansökan KBS-3-systemet enligt miljöbalken. Mark- och miljödomstolen, Nacka tingsrätt. <http://www.nackatingsratt.domstol.se/Om-tingsratten/Ansokan-om-slutforvar-for-anvant-karnbransle-mm/Mal-1333-11-Aktbilaga-1-13>.

SKB, 2011c. Ansökan inkapslingsanläggning enligt kärntekniklagen. SSM diarienummer SSM2011-1136. Clink (Tillståndsprövningsprojektet) Ansökan 2011 om tillstånd enligt kärntekniklagen för inkapslingsanläggning och centralt mellanlager för använt kärnbränsle. Tillgänglig: <http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/start/slutforvar/Ansokningarna/>

- SKB, 2011d.** Kärntekniska industrins praxis för friklassning av material, lokaler och byggnader samt mark. SKB R-11-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2011e.** Redovisning av säkerhet efter förslutning av slutförvaret för använt kärnbränsle. Huvudrapport från projekt SR-Site. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2011f.** Samhällsforskningen 2004–2010. Teman, resultat och reflektioner. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2011g.** Social science research 2004–2010. Themes, results and reflections. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2012.** KBS-3H complementary studies 2008–2010. SKB TR-12-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2013a.** Plats för slutförvaring av kortlivat rivningsavfall. SKB P-13-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2013b.** Site description of the SFR area at Forsmark at completion of the site investigation phase. SDM-PSU Forsmark. SKB TR-11-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB 2013c.** Decommissioning Study of Forsmark NPP. SKB R-13-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2013d.** Decommissioning Study of Oskarshamn NPP. SKB R-13-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2013e.** Ringhals Site Study 2013 – An assessment of the decommissioning cost for the Ringhals site. SKB R-13-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Smart N R, Rance A P, 2009.** Miniature canister corrosion experiment – results of operations to May 2008. SKB TR-09-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Smart N R, Blackwood D J, Marsh G P, Naish C C, O'Brien T M, Rance A P, Thomas M I, 2004.** The anaerobic corrosion of carbon and stainless steels in simulated cementitious repository environments: a summary review of Nirex research. AEAT/ERRA-0313, AEA Technology PLC.
- Smart N R, Rance A P, Reddy B, Lydmark S, Pedersen K, Lilja C, 2011.** Further studies of *in situ* corrosion testing of miniature copper-cast iron nuclear waste canisters. Corrosion Engineering, Science and Technology 46, 142–147.
- Smart N R, Reddy B, Rance A P, 2012a.** Miniature Canister (MiniCan). Corrosion experiment progress report 4 for 2008–2011. SKB P-12-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Smart N R, Rance A P, Reddy B, Fennell P, Winsley R J, 2012b.** Analysis of SKB MiniCan Experiment 3. SKB TR-12-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Smellie J, 2004.** Recent geoscientific information relating to deep crustal studies. SKB R-04-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Smith P, Neall F, Snellman M, Pastina B, Hjerpe T, Nordman H, Johnson L, 2008.** Safety assessment for a KBS-3H spent nuclear fuel repository at Olkiluoto. Summary report. SKB R-08-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sohlenius G, Saetre P, Nordén S, Grolander S, Sheppard S, 2013.** Inferences about radionuclide mobility in soils based on the solid/liquid partition coefficients and soil properties. *Ambio* 42, 414–424.
- Soneryd L, Lidskog R, 2006.** Allmänhet, expertis och deliberation. Samråd om slutförvar av kärnavfall. SKB R-06-118, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Soroka I L, Shchukarev A, Jonsson M, Tarakina N V, Korzhavyi P A, 2013.** Cuprous hydroxide in a solid form: does it exist? *Dalton Transactions* 42, 9585–9594.
- SSM, 2011.** Granskning och utvärdering av SKB:s redovisning av SKB:s Fud-program 2010. Rapport 2011:10, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- SSMFS 2008:1.** Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om säkerhet i kärntekniska anläggningar. Stockholm: Strålsäkerhetsmyndigheten.
- SSMFS 2008:21.** Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall. Stockholm: Strålsäkerhetsmyndigheten.
- Stennett M C, Corkhill C L, Marshall L A, Hyatt N C, 2013.** Preparation, characterisation and dissolution of a CeO₂ analogue for UO₂ nuclear fuel. *Journal of Nuclear Materials* 432, 182–188.
- Stigsson M, Munier R, 2013.** Orientation uncertainty goes bananas: an algorithm to visualise the uncertainty sample space on stereonets for oriented objects measured in boreholes. *Computers & Geosciences* 56, 56–61.
- Stille H, 2012.** Rock grouting in tunnel construction – models and design. I Proceedings of International Symposium EUROCK 2012 - Rock engineering and technology for sustainable underground construction, Stockholm 28–30 May 2012. Stockholm: BeFo, Lissabon: International Society for Rock Mechanics.

- Stotler R L, Frapé S K, Ahonen L, Clark I, Greene S, Hobbs M, Johnson E, Lemieux J-M, Peltier R, Pratt L, Ruskeenieni T, Sudicky E, Tarasov L, 2010.** Origin and stability of a permafrost methane hydrate occurrence in the Canadian Shield. *Earth and Planetary Science Letters* 296, 384–394.
- Strandberg G, Brandefelt J, Kjellström E, Smith B, 2010.** High-resolution regional simulation of last glacial maximum climate in Europe. *Tellus* 63A, 107–125.
- Strömngren M, Lindgren F, 2011.** Mapping of reed in shallow bays. SFR-Site Forsmark. SKB P-11-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sundberg J, Back P-E, Hellström G, 2005.** Scale dependence and estimation of rock thermal conductivity. Analysis of upscaling, inverse thermal modelling and value of information with the Äspö HRL prototype repository as an example. SKB R-05-82, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sundberg J, Wrafter J, Ländell M, Back P-E, L Rosén, 2008.** Thermal properties Forsmark. Modelling stage 2.3. Complementary analysis and verification of the thermal bedrock model, stage 2.2. SKB R-08-65, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sundberg J, Back P-E, Ländell M, Sundberg A, 2009.** Modelling of temperature in deep boreholes and evaluation of geothermal heat flow at Forsmark and Laxemar. SKB TR-09-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sundquist G, 2002.** The bedrock of opinion: science, technology and society in the siting of high-level nuclear waste. Dordrecht: Kluwer Academic.
- Svensson D, Dueck A, Nilsson U, Olsson S, Sandén T, Lydmark S, Jägerwall S, Pedersen K, Hansen S, 2011.** Alternative buffer material. Status of the ongoing laboratory investigation of reference materials and test package 1. SKB TR-11-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Svensson P D, Hansen S, 2010.** Freezing and thawing of montmorillonite – a time-resolved synchrotron X-ray diffraction study. *Applied Clay Science* 49, 127–134.
- Svensson U, 2009.** Groundwater flow modelling of the excavation and operational phases – Forsmark. SKB R-09-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Svensson U, 2010.** DarcyTools version 3.4. Verification, validation and demonstration. SKB R-10-71, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Swanton S W, Alexander W R, Berry J A, 2010.** Review of the behaviour of colloids in the near field of a cementitious repository. Report to NDA RWMD. Serco/TAS/000475/01, Serco, UK.
- Söderberg O, 2012.** SKB:s program för samhällsforskning 2004–2011. En utvärdering. SKB P-12-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Söderbäck B (red), 2008.** Geological evolution, palaeoclimate and historical development of the Forsmark and Laxemar-Simpevarp areas. Site descriptive modelling. SDM-Site. SKB R-08-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Söderbäck B, Lindborg T, 2009.** Surface system Laxemar-Simpevarp. Site descriptive modelling, SDM-Site Laxemar. SKB R-09-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Tagesson T, 2012.** Turbulent transport in the atmospheric surface layer. SKB TR-12-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Taniguchi N, Kawasaki M, 2008.** Influence of sulphide concentration on the corrosion behavior of pure copper in synthetic seawater. *Journal of Nuclear Materials* 379, 154–161.
- Taxén C, 2011.** Possible effects of external electrical fields on the corrosion of copper in bentonite. SKB P-11-43, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Taxén C, Lundholm M, Persson D, Jakobsson D, Sedlakova M, Randelius M, Karlsson O, Rydgren P, 2012.** Analyser av koppar från prototypkapsel 5 och 6. SKB P-12-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Thorsell P-E, 2011.** Studier av frysegenskaper hos betong från 1 BMA. SKB P-13-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Tohidi B, Chapoy A, Smellie J, Puigdomenech I, 2010.** The potential for methane hydrate formation in deep repositories of spent nuclear fuel in granitic rocks. SKB R-10-58, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Torudd J, 2010.** Long term radiological effects on plants and animals of a deep geological repository. SR-Site Biosphere. SKB TR-10-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Torudd J, Saetre P, 2013.** Assessment of long-term radiological effects on plants and animals from a deep geological repository: no discernible impact detected. *Ambio* 42, 506–516.
- Trafikverket, 2011.** TVRK Tunnel 11: Trafikverkets tekniska krav Tunnel. Stockholm: Trafikverket. (TRV publikation 2011:087)

- Treadaway K W J, Cox R N, Brown B L, 1989.** Durability of corrosion resisting steels in concrete. ICE Proceedings 86, 305–331.
- Trinchero P, Molinero J, Román-Ross G, 2013.** FASTREACT – A streamline-based approach for the solution of multicomponent reactive transport problems. SKB R-10-45, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Trummer M, Jonsson M, 2010.** Resolving the H₂-effect on radiation induced of UO₂-based spent nuclear fuel. Journal of Nuclear Materials 396, 163–169.
- Trummer M, Dahlgren B, Jonsson M, 2010.** The effect of Y₂O₃ on the dynamics of oxidative dissolution of UO₂. Journal of Nuclear Materials 407, 195–199.
- Truvé J, 2012.** Inventering av daggdjur i Forsmark och Hållnäs. SKB P-12-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Tryggvason A, Linde N, 2006.** Local earthquake (LE) tomography with joint inversion for P- and S-wave velocities using structural constraints. Geophysical Research Letters 33. doi:10.1029/2005GL025485
- Tröjbom M, Grolander S, 2010.** Chemical conditions in present and future ecosystems in Forsmark – implications for selected radionuclides in the safety assessment SR-Site. SKB R-10-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Tröjbom M, Nordén S, 2010.** Chemistry data from surface ecosystems in Forsmark and Laxemar-Simpevarp. Site specific data used for estimation of CR and K_d values in SR-Site. SKB R-10-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Tsuji M, Holmberg M, Stille B, Rafi J Y, Stille H, 2012.** Optimization of the grouting procedure with RTGC method. Data from a trial grouting at city line project in Stockholm. SKB R-12-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Tullborg E-L, Drake H, Sandström B, 2008.** Palaeohydrogeology: a methodology based on fracture mineral studies. Applied Geochemistry 23, 1881–1897.
- Tullborg E-L, Smellie J, Nilsson A-C, Gimeno M J, Auqué L F, Blüchert V, Molinero J, 2010a.** SR-Site – sulphide content in the groundwater at Forsmark. SKB TR-10-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Tullborg E-L, Smellie J, Nilsson A-C, Gimeno M J, Auqué L F, Wallin B, Brüchert B V, Jönsson S, Molinero J, 2010b.** SR-Site – sulphide content in the groundwater at Laxemar. SKB R-10-62, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- USNRC, 2010a.** Spent fuel decay heat measurements performed at the Swedish Central Interim Storage Facility. NUREG/CR-6971, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC.
- USNRC, 2010b.** Validation of SCALE 5 decay heat predictions for LWR spent nuclear fuel. NUREG/CR-6972, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC.
- van As D, Hubbard A L, Hasholt B, Mikkelsen A B, van den Broeke M R, Fausto R S, 2012.** Large surface meltwater discharge from Kangerlussuaq sector of the Greenland ice sheet during the record-warm year 2010 explained by detailed energy balance observations. The Cryosphere 6, 199–209.
- Van Loon L R, Glaus M A, 1997.** Review of the kinetics of alkaline degradation of cellulose in view of its relevance for safety assessment of radioactive waste repositories. Journal of Environmental Polymer Degradation 5, 97–109.
- Van Loon L R, Glaus M A, 1998.** Experimental and theoretical studies on alkaline degradation of cellulose and its impact on the sorption of radionuclides. PSI Bericht 98-07, Paul Scherrer Institut, Schweiz, Nagra NTB 97-04, Nagra, Schweiz.
- Van Loon L R, Hummel W, 1999.** Radiolytic and chemical degradation of strong acidic ion-exchange resins: study of the ligands formed. Nuclear Technology 128, 359–370.
- Van Loon L R, Kopajtic Z, 1991.** Complexation of Cu²⁺, Ni²⁺, and UO₂²⁺ by radiolytic degradation products of bitumen. Radiochimica Acta 54, 193–198.
- van Meerbeeck C J, Renssen H, Roche D M, Wohlfarth B, Bohncke S J P, Bos J A A, Engels S, Helmens K F, Sánchez-Goñi M-F, Svensson A, Vandenberghe J, 2011.** The nature of MIS 3 stadial-interstadial transitions in Europe: new insights from model-data comparisons. Quaternary Science Reviews 30, 3618–3637.
- Vecernik P, Havlova V, Löfgren M, 2012.** Determination of migration parameters (F_r, D_e): application of electromigration method on samples of different length. I Rabung T, Molinero J, Garcia D, Montoya V (red). 1st Workshop Proceedings of the Collaborative Project “Crystalline Rock Retention Processes” (7th EC FP CP CROCK) Stockholm, 22–24 May 2012. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 137–147.
- Vidstrand P, Rhén I, 2010.** On the role of model depth and hydraulic properties for groundwater flow modelling during glacial climate conditions. SKB R-10-74, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Vidstrand P, Follin S, Zucec N, 2010a.** Groundwater flow modelling of periods with periglacial and glacial conditions – Forsmark. SKB R-09-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Vidstrand P, Rhén I, Zucec N, 2010b.** Groundwater flow modelling of periods with periglacial and glacial climate conditions – Laxemar. SKB R-09-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Vidstrand P, Follin S, Selroos J-O, Näslund J-O, Rhén I, 2012.** Modeling of groundwater flow at depth in crystalline rock beneath a moving ice-sheet margin, exemplified by the Fennoscandian Shield, Sweden. *Hydrogeology Journal* 21, 239–255.
- Vilarrasa V, Koyama T, Neretnieks I, Jing L, 2011.** Shear-induced flow channels in a single rock fracture and their effect on solute transport. *Transport in Porous Media* 87, 503–523.
- Villar M V, 2002.** Thermo-hydro-mechanical characterisation of a bentonite from Cabo de Gata. A study applied to the use of bentonite as sealing material in high level radioactive waste repositories. *Publicación Técnica* 04/2002, ENRESA, Spanien.
- Vogt C, Lagerblad B, Wallin K, Baldy F, Jonasson J-E, 2009.** Low pH self compacting concrete for deposition tunnel plugs. SKB R-09-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- von Lenza W, Nabbi R, Rossbach M (red), 2007.** RED-impact. Impact of partitioning, transmutation and waste reduction technologies on the final nuclear waste disposal. Synthesis report. Jülich: Forschungszentrum Jülich.
- Werner K, Hamrén U, Collinder P, 2010a.** Vattenverksamhet i Forsmark (del I). Bortledande av grundvatten från slutförvarsanläggningen för använt kärnbränsle. SKB R-10-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Werner K, Hamrén U, Collinder P, 2010b.** Vattenverksamhet i Laxemar-Simpevarp. Slutförvarsanläggning för använt kärnbränsle – bortledande av grundvatten samt vattenverksamheter ovan mark. SKB R-10-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Werner K, Collinder P, Berglund S, Bosson E, 2011.** Groundwater diversion from a deep-rock repository for spent nuclear fuel: Ecohydrological assessment of environmental impacts. *Radioprotection* 46, S661–S667.
- Werner K, Collinder P, Berglund S, Mårtensson E, 2013.** Ecohydrological responses to diversion of groundwater: case study of a deep-rock repository for spent nuclear fuel in Sweden. *Ambio* 42, 517–526.
- Whitehouse P, 2009.** Glacial isostatic adjustment and sea-level change. State of the art report. SKB TR-09-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Widestrand H, Byegård J, Selnert E, Skålberg M, Höglund S, Gustafsson E, 2010a.** Äspö Hard Rock Laboratory. Long Term Sorption Diffusion Experiment (LTDE-SD). Supporting laboratory program – Sorption diffusion experiments and rock material characterisation. With supplement of adsorption studies on intact rock samples from the Forsmark and Laxemar site investigations. SKB R-10-66, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Widestrand H, Byegård J, Nilsson K, Höglund S, Gustafsson E, Kronberg M, 2010b.** Äspö Hard Rock Laboratory. Long Term Sorption Diffusion Experiment (LTDE-SD). Performance of main in-situ experiment and results from water phase measurements. SKB R-10-67, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Wohlfarth B, 2013.** A review of Early Weichselian climate (MIS 5d-a) in Europe. SKB TR-13-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Wu R, Seitisleam F, Sandström R, Jin L-Z, 2011.** Creep crack growth in phosphorus alloyed oxygen free copper. SKB R-11-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Wu R, Sandström R, Jin L-Z, 2013.** Creep crack growth in phosphorus alloyed oxygen free copper. *Materials Science and Engineering A* 583, 151–160.
- Yagodzinskyy Y, Malitckii E, Saukkonen T, Hänninen H, 2012.** Hydrogen-enhanced creep and cracking of oxygen-free phosphorus-doped copper. *Scripta Materialia* 67, 931–934.
- Yakub E, 2011.** Helium solubility in uranium dioxide from molecular dynamics simulations. *Journal of Nuclear Materials* 414, 83–87.
- Yakub E, Ronchi C, Staicu C, 2010.** Diffusion of helium in non-stoichiometric uranium dioxide. *Journal of Nuclear Materials* 400, 189–195.
- Yang M, Fidalgo A B, Sundin S, Jonsson M, 2013.** Inhibition of radiation induced dissolution of UO₂ by sulphide – a comparison with the hydrogen effect. *Journal of Nuclear Materials* 434, 38–42.
- Yun Y, Eriksson O, Oppeneer P M, 2009.** Theory of He trapping, diffusion, and clustering in UO₂. *Journal of Nuclear Materials* 385, 510–516.
- Zanonato P L, Di Bernardo P, Szabó Z, Grenthe I, 2012.** Chemical equilibria in the uranyl(VI)-peroxide-carbonate system; identification of precursors for the formation of poly-peroxometallates. *Dalton Transactions* 41, 11635–11641.

Zwicky H-U, Low J, Ekeröth E, 2011. Corrosion studies with high burnup light water reactor fuel. Release of nuclides into simulated groundwater during accumulated contact time of up to two years. SKB TR-11-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Åkermark T, 2013. Some scientific considerations on the article: 'Scientific basis for corrosion of copper in water and implications for canister lifetimes' published by F. King and C. Lilja. Corrosion Engineering, Science and Technology. doi: 10.1179/147842213X13716277864060

Åkesson M, Kristensson O, Börgesson L, Dueck A, Hernelind J, 2010. THM modelling of buffer, backfill and other system components. Critical processes and scenarios. SKB TR-10-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Åkesson M, Malmberg D, Börgesson L, Hernelind J, Ledesma A, Jacinto A, 2012a. Temperature buffer test. Final THM modelling. SKB P-12-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Åkesson M, Olsson S, Dueck A, Nilsson U, Karnland O, Kiviranta L, Kumpulainen S, Lindén J, 2012b. Temperature buffer test. Hydro-mechanical and chemical/mineralogical characterizations. SKB P-12-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Åstrand P-G, Broed R, Jones J, 2005. Pandora technical description and user guide. Posiva Working Report 2005-64, Posiva Oy, Finland.

Öhman J, Follin S, 2010. Site investigation SFR. Hydrogeological modelling of SFR. Model version 0.2. SKB R-10-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Öhman J, Bockgård N, Follin S, 2011a. Bedrock hydrogeology. Site investigation SFR. SKB R-11-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Öhman J, Follin S, Odén M, 2011b. Bedrock hydrogeology – Groundwater flow modelling. Site investigation SFR. SKB R-11-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Opublicerade dokument

SKBdoc id, version	Titel	Utfärdare, år
1091554 ver 3.0	Säkerhetsredovisning för drift av slutförvarsanläggning för använt kärnbränsle (SR-Drift) kapitel 3 – Krav och konstruktionsförutsättningar.	SKB, 2010
1179234 ver 1.0	Referensrapport till SAR allmän del kapitel 6 – Källtermer.	SKB, 2009
1199888 ver 1.0	Verksamhet, ledning och styrning – Uppförande.	SKB, 2011
1323062 ver 1.0	Begäran om förtydligande information	Strålsäkerhetsmyndigheten, 2011
1339709 ver 1.0	C-14 accumulated in ion exchange resins in Swedish nuclear power plants.	SKB, 2012
1333256 ver 2.0	Svar på begäran om kompletteringar angående kapsel frågor.	SKB, 2012
1359832 ver 1.0	Avveckling och rivning av kärnkraftblock.	SKB, 2012
1378692 ver 1.0	Report to SKB on the rational synthesis of the isosacarinic acids.	SKB, 2013

Förkortningar

Ab initio	Latin för ”från början”.
ABM	Alternativa buffertmaterial. Experiment i Äspölaboratoriet där möjliga buffertmaterial undersöks.
ALARA	As low as reasonably achievable. Begränsning av stråldoser så långt detta rimligen kan åstadkommas med hänsyn tagen till såväl ekonomiska som samhälleliga faktorer.
Andra	Agence national pour la gestion des déchets radioactifs, Frankrike.
ANU	Modell för inlandsisrekonstruktioner.
Apse	Äspö pillar stability experiment. Avslutat experiment i Äspölaboratoriet för studier av hur stor belastning berget tål.
Asha	Indisk bentonit från Kutch-regionen.
ASIED	Alpha self-irradiation enhanced diffusion. Ökad diffusion till följd av egenstråld alfastrålning.
ATB	Avfallstransportbehållare.
ATB 1T	En ny behållare för transport av långlivat låg- och medelaktivt avfall i BFA-tankar.
BAT	Best available technique. Bästa tillgängliga teknik.
Belbar	Bentonite erosion: effects on the long term performance of the engineered barrier and radionuclide transport. EU-projekt om bentonitstabilitet och buffererosion.
BFA	Bergrum på Simpevarpshalvön för torr mellanlagring av driftavfall.
BFA-tank	Behållare för torr mellanlagring av långlivat låg- och medelaktivt avfall.
Bioprotä	Internationellt samarbetsprojekt om nyckelfrågor för bedömning av långsiktig radiologisk säkerhet i biosfären.
Bips	Borehole image processing system. Videofotografering av borrhållsväggen.
BKAB	Barsebäck Kraft AB.
BLA	Bergssal för lågaktivt avfall i SFR.
BMA	Bergssal för medelaktivt avfall i SFR.
BTF	Betongtankförvar i SFR, främst avsett för avvattnad jonbytarmassa.
BRT	Bergssal för hela reaktortankar.
Brie	Bentonite rock interaction experiment. Experiment i Äspölaboratoriet för att förbättra förståelsen för hur vatten rör sig från berget till bentonitbufferten i Kärnbränsleförvaret.
BWR	Boiling water reactor. Kokvattenreaktor.
CAD	Computer aided design. Datorstödd design.
Caps	Counterpressure applied to prevent spalling. Avslutat experiment i Äspölaboratoriet där möjligheterna att minska risken för bergutfall undersökts.
Ciemat	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Spanien.
Clab	Centralt mellanlager för använt kärnbränsle.
Clink	Central anläggning för hantering, mellanlagring och inkapsling av använt kärnbränsle.
CRT	Canister retrieval test. Avslutat experiment i Äspölaboratoriet där möjligheterna att ta upp en redan deponerad kapsel ur ett deponeringshål undersökts.
CSH	Kalciumsilikahydrat.
Detum	Projekt för vidareutveckling av metoder, verktyg och program för undersökningar och modellering inför byggstart av Kärnbränsleförvaret.

DFN	Discrete fracture network. Diskret spricknätverksmodell.
DIC	Dissolved inorganic carbon. Löst oorganiskt kol.
DOC	Dissolved organic carbon. Löst organiskt kol.
Domplu	Dome plug experiment. Fullskaletest i Äspölaboratoriet för att testa och demonstrera det kompletta pluggsystemet. Testet ingår i EU-samarbetsprojektet Dopas.
EC	European Community. Europeiska unionen.
EDZ	Excavation damaged zone. Skadad zon. Det berg runt ett berguttag där irreversibla förändringar ägt rum.
EFPC	Expanded full perimeter criterion. Ett kriterium som anger att ett kapselläge i Kärnbränsleförvaret inte får skäras av en spricka som också fullständigt skär deponeringstunnelns omkrets.
EPRI	Electric Power Research Institute, USA.
Erica	Environmental risk from ionising contaminants. Verktyg för att analysera biologiska effekter av joniserande strålning i livsmiljöer och ekosystem.
FEM	Finite element method. Finita elementmetoden.
FEP	Feature, events and processes. De faktorer (egenskaper, händelser och processer) som skulle kunna tänkas påverka säkerheten hos olika typer av slutförvar. Dessa finns dokumenterade i den internationella FEP-databasen som administreras av OECD:s atomenergibyrå NEA.
FKA	Forsmarks Kraftgrupp AB.
FPC	Full perimeter criterion. Ett kriterium som anger att om en spricka observeras runt en deponeringstunnels hela omkrets i Kärnbränsleförvaret, får inget deponeringshål placeras så att det skulle skära den antagna förlängningen av sprickan.
FoU	Forskning och utveckling.
FSW	Friction Stir Welding. Friktionsomrörningssvetsning.
Fud	Forskning, utveckling och demonstration.
Gadd	Gemensam avfallsdatabas för registrering och rapportering av det låg- och medelaktiva, kort- och långlivade, avfallet som hanteras eller förvaras vid SFR, Clab, OKG, BKAB, RAB och FKA.
GAP	Greenland Analogue Project. Projekt i samarbete med Posiva och NWMO med syftet att genom observationer vid en existerande inlandsis öka kunskapen kring hur grundvattenflöde och grundvattenkemi i kristallin berggrund påverkas av en inlandsis. Resultaten utnyttjas bland annat vid analysen av långsiktig säkerhet hos slutförvaret för använt kärnbränsle.
GEUS	De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland.
Gia	Glacial isostatic adjustment. Modell för att analysera den isostatiska responsen givet en viss islasthistorik.
Gis	Geographic information system. Geografiska informationssystem.
Grasp	Greenland analogue surface project. SKB-aktivitet med syfte dels att identifiera skillnader i långsiktiga förändringsprocesser i ytnära system mellan ett kallt och ett tempererat klimat, dels att undersöka hur de hydrologiska egenskaperna och ekosystemens egenskaper varierar beroende på klimatförhållanden.
HMS	System för hydromonitoring.
ITU	Institute for Transuranium Elements, Tyskland.
IRF	Instant release fraction. Begrepp inom säkerhetsanalysen som definierar de radionuklider i använt kärnbränsle som antas vara omedelbart lösliga.
ISO-container	Behållare i storlekar standardiserade av Internationella standardiseringsorganisationen (ISO) vilka kan lastas på järnvägsvagnar, lastbilar och fraktfartyg.
KBS-3H	KBS-3-metoden med horisontell deponering.

K _d	Sorptionskoefficient, fördelningskoefficient.
KTB	Kapseltransportbehållare.
Lasgit	Large scale gas injection test. Experiment i Äspölaboratoriet för undersökning av vad som händer med den gas som bildas när kapselns insats korroderar.
Loma	Låg- och medelaktivt avfall.
Lot	Long term test of buffer material. Experiment i Äspölaboratoriet med syftet att ta reda på hur i första hand bentonitlera uppför sig vid förhållanden som liknar dem i ett slutförvar för använt kärnbränsle.
LTDE-SD	Long term diffusion experiment – Sorption-diffusion. Avslutat experiment i Äspölaboratoriet för att studera i vilken utsträckning olika radioaktiva ämnen tar sig in i bergmatrisen.
Mis	Marina isotopstadium.
Mox	Mixed oxide fuel. Blandoxidbränsle.
MTO	Människa, teknik, organisation.
MX-80	Natriumbentonit från Wyoming. Möjligt buffertmaterial.
Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung von Radioaktiver Abfälle, Schweiz.
NDA	Nuclear Decommission Authority, Storbritannien.
NEA	Nuclear Energy Agency. En samarbetsorganisation för atomenergifrågor inom OECD.
NWMO	Nuclear Waste Management Organization, Kanada.
Numo	Waste management organisation of Japan.
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development.
OKG	OKG Aktiebolag.
Pebs	Long-term performance of engineered barrier systems. EU-projekt med syfte att utvärdera funktionen hos en förslutning av ett geologiskt förvar liksom hur funktionen hos tekniska barriärer förändras med tiden.
PFL	Posiva flow log. Metod för mätning av vattengenomsläpplighet.
POC	Particulate organic carbon. Partikulärt organiskt kol.
Posiva	Posiva Oy, Finland.
PRECCI	Programme de recherche sur l'évolution à long terme des colis de combustibles irradiés. Forskningsprogram i Frankrike om den långsiktiga utvecklingen av bestrålat bränsle.
PSAR	Preliminary safety assessment report. Preliminär säkerhetsredovisning.
PSI	Paul Scherrer Institute, Schweiz.
PSU	Projekt SFR-utbyggnad.
PWR	Pressurized water reactor. Tryckvattenreaktor.
QA	Quality assurance. Kvalitetssäkring.
RAB	Ringhals AB.
Rawra	Radioactive waste repository authority, Tjeckien.
RH	Relative humidity. Relativ fuktighet.
RNR	Radionuclide retention experiment. Avslutat experiment i Äspölaboratoriet för att undersöka hur berget fördröjer och filtrerar radioaktiva ämnen.
SAR	Safety assessment report. Säkerhetsredovisning.
SDM	Site description modell. Platsbeskrivande modell.
SFL	Slutförvaret för långlivat avfall.
SFR	Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall.

SGU	Sveriges geologiska undersökning.
Sicada	Site characterization database system. Databassystem för att lagra och hantera data från de olika typer av geovetenskapliga undersökningar som SKB utför. Även data från de experiment som utförs vid Äspölaboratoriet lagras i databasen.
SNSN	Svenska nationella seismiska nätet.
SR-Can	Preliminär bedömning av säkerheten för KBS-3-förvar vid Forsmark och Laxemar med kapslar enligt ansökan för inkapslingsanläggningen, publicerad av SKB i november 2006. Can efter engelskans ”canister” (kapsel).
SR-PSU	Säkerhetsredovisning för projekt SFR-utbyggnad.
SR-Site	Redovisning av säkerhet efter förslutning av slutförvaret för använt kärnbränsle, publicerad i mars 2011. Site efter engelskans ”site” (plats).
SSM	Strålsäkerhetsmyndigheten.
Suus	Säkerhet under uppförande av slutförvarsanläggningen.
SVAFO	AB SVAFO. Ägs av Ringhals AB, Forsmarks Kraftgrupp AB, OKG Aktiebolag och Barsebäck Kraft AB.
Swiw	Single well injection withdrawal tracer test. Avslutat experiment i Äspölaboratoriet för att studera hur vattnet i bergets porer och områden med stagnanta (stillastående) förhållanden påverkar grundvattnet.
Tass	Tunnel för försök i Äspölaboratoriet.
TBM	1) Tunnel boring machine. Tunnelborrmaskin. 2) Borrard tunnel för försök i Äspölaboratoriet.
TBT	Temperature buffer test. Avslutat experiment i Äspölaboratoriet med franska stålkapslar för att studera om man kan deponera två kapslar ovanpå varandra och hur bentonitleran påverkas av höga temperaturer.
TF EBS	Task force on engineered barrier systems. Internationellt samarbetet mellan specialister och modelleringsgrupper kring frågor om de tekniska barriärerna i det framtida slutförvaret.
THM	Termisk, hydraulisk, mekanisk.
True	Tracer retention understanding experiments. Avslutat experiment i Äspölaboratoriet. Spårämnesförsök i olika skalor för att se i vilken grad resultat som uppnått i en skala också är giltiga för en annan.
TVO	Teollisuuden Voima Oyj. Finskt kärnkraftbolag som bygger en ny reaktor i Olkiluoto.