

R-01-55

Forsknings-, utvecklings- och demonstrationsprogram för ett KBS-3-förvar med horisontell deponering

Svensk Kärnbränslehantering AB

December 2001

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co
Box 5864
SE-102 40 Stockholm Sweden
Tel 08-459 84 00
+46 8 459 84 00
Fax 08-661 57 19
+46 8 661 57 19



ISSN 1402-3091

SKB Rapport R-01-55

Forsknings-, utvecklings- och demonstrationsprogram för ett KBS-3-förvar med horisontell deponering

Svensk Kärnbränslehantering AB

December 2001


Förord

Ett djupförvar av KBS-3-modell kan arrangeras på flera olika sätt. Den slutliga utformningen påverkas av hur de tekniska systemen optimeras och hur förvaret anpassas till de rådande geologiska förhållandena.

Den nuvarande referensutformningen av djupförvaret med vertikal deponering bygger på kunskap om svensk berggrund på 400–700 meters djup. Layouten är generell och ska med tiden anpassas till förhållandena på de platser där platsundersökningar ska göras och slutligen även till den plats där detaljundersökningen ska ske.

Det fortsatta arbetet med KBS-3-metoden omfattar även studiet av varianter. En sådan är horisontell deponering. Denna rapport redovisar vilken forskning, utveckling och demonstration som skulle krävas för att förvarsvarianten KBS-3 med horisontell deponering av flera kapslar i samma deponeringshål på likvärdiga grunder ska kunna jämföras med SKB:s referensutformning KBS-3 med vertikal deponering.

Arbetet har utförts av en projektgrupp under ledning av undertecknad med följande sammansättning: Berit Lundqvist (SKB), Raymond Munier (SKB), Patrik Sellin (SKB), Anders Bodén (Swedpower AB), Olle Broman (Ekonomisk Byggnation AB), Hans Jendenius (Sweco Industriteknik), Pal Kalbantner (ÅF Energikonsult AB), Roland Pusch (Geodevelopment AB) och Håkan Sandstedt (Scandiaconsult Sverige AB).



Stig Pettersson

Sammanfattning

Denna rapport redovisar vilken forskning, utveckling och demonstration som skulle krävas för att förvarsvarianten KBS-3 med horisontell deponering av flera kapslar i samma deponeringshål på likvärdiga grunder ska kunna jämföras med SKB:s referensutformning KBS-3 med vertikal deponering.

Ett KBS-3-förvar med horisontell deponering innebär att kapslarna deponeras horisontellt efter varandra i 200–250 meter långa deponeringshål. Eftersom både kapslar och bentonitblock antas ha samma utformning som i referensutformningen anses horisontell deponering vara en variant av denna, inte en alternativ förvarsmetod.

I ett KBS-3-förvar med horisontell deponering finns inga deponeringstunnlar. Deponeringshålen utgår i stället direkt från transporttunnlarna. Detta innebär att den totalt uttagna bergmassan blir betydligt mindre än för referensutformningen. Därmed sänks kostnaderna för att bygga förvaret. Tidigare kostnadsberäkningar har indikerat att besparingen kan ligga i storleksordningen 1 000 MSEK. Några ytterligare kostnadsberäkningar har inte gjorts inom ramen för detta projekt. Besparingspotentialen är starkt beroende av de geologiska förutsättningarna, dvs av hur många kapselpositioner som måste förkastas på grund av brantstående vattenförande zoner och hur omfattande injekterings- och förstärkningsarbeten som måste göras. Även grundvattnets salthalt har betydelse. En hög salthalt medför att det behövs mer bentonit i återfyllningen av deponeringstunnlarna i referensutformningen, eftersom bentonitens svällförmåga försämras vid höga salthalter. Besparingen blir då ännu större för det horisontella deponeringsalternativet.

Miljöpåverkan när det gäller utsläpp till luft blir mindre för ett KBS-3-förvar med horisontell deponering jämfört med referensutformningen. Utsläppen till luft från spränggaser och transporter av sprängsten kan antas vara direkt proportionella mot volymen uttaget berg och därmed också till mängden avgaser från transporter samt utsläpp av spränggaser.

Detta FUD-program har i största möjliga utsträckning anpassats till SKB:s referens-tidsplan för djupförvaret. Programmet genomförs stegvis under åren 2002–2010.

- Förstudie under år 2002.
- Konceptuell utformning under år 2003.
- Tillverkning av utrustning samt demonstration och övriga fälttester vid Äspö-laboratoriet under åren 2004–2008.
- Utvärdering under år 2009–2010.

Varje steg avslutas med en kontrollstation där beslut fattas om, och i så fall hur, nästa steg ska genomföras.

Tidsramarna för programmet är mycket snävt satta. En förutsättning för att programmet ska kunna genomföras enligt tidsplan är att tillräckliga resurser kan allokeras. Speciellt kritiska områden när det gäller resurser är säkerhetsanalys och buffertfrågor.

FUD-programmet är indelat i följande huvudområden:

- Förvarsutformning.
- Säkerhetsanalyser.
- Buffert.
- Geovetenskap.
- Borrning.
- Injektering/bergförstärkning.
- Deponeringsteknik.
- Pluggning av deponeringshål.
- Återtag.

Totalkostnaderna för hela programmet uppgår till 150 MSEK.

Programmet fokuserar framför allt på frågor som rör bufferten och dess samverkan med deponeringsbehållaren samt på den långsiktiga säkerheten. Borrning av horisontella deponeringshål, deponeringsteknik och i viss mån återtag är andra områden som inte är så utvecklade som för ett KBS-3-förvar med vertikal deponering.

Det första steget i programmet inriktar sig främst på att ta fram ett fungerande anläggningskoncept och göra en preliminär säkerhetsbedömning. Utgångspunkten är att kapseln och bufferten ska deponeras i paket med en omslutande deponeringsbehållare av stål. Deponeringsbehållaren kan vara perforerad eller helt sluten. Vid deponeringen placeras distansheter av bentonit mellan paketen.

För att pröva idéerna i praktiken bör också ett speciellt demonstrationsprojekt i Äspö-laboratoriet genomföras. En cirka 50 meter lång tunnel bör borraras där kapslar kan deponeras under realistiska förhållanden. Liksom i fallet med ett KBS-3-förvar med vertikal deponering bör en prototyp till en deponeringsmaskin tas fram. I ett senare skede bör även återtag av kapslar prövas med för ändamålet framtagen utrustning.

Innehållsförteckning

	Sida
1 Inledning	9
1.1 Bakgrund	9
1.2 Vilka krav finns på ett förvar för använt kärnbränsle?	10
2 Horisontell deponering	13
2.1 Tidigare utredningar	13
2.1.1 PASS-projektet	13
2.1.2 JADE-projektet	14
2.2 Utländska erfarenheter av horisontell deponering	16
2.2.1 Finland	16
2.2.2 Spanien	18
2.2.3 Schweiz	20
3 FUD-programmets uppbyggnad	23
3.1 Stegvis genomförande	23
3.2 Struktur	24
4 Förvarsutformning	25
4.1 Kunskapsläge	26
4.2 Program	26
5 Säkerhetsanalys	27
5.1 Kunskapsläge	27
5.2 Program	30
6 Buffert	31
6.1 Kunskapsläge	31
6.1.1 Kemiska förändringar	31
6.1.2 Främmande material	32
6.2 Program	32
7 Geovetenskap	35
7.1 Kunskapsläge	35
7.1.1 Slutsatser från JADE-projektet	35
7.1.2 Geologiska förutsättningar för horisontell deponering	36
7.1.3 Hydrogeologi	37
7.1.4 Bergmekanik	37
7.1.5 Strukturgeologi	38
7.1.6 Beräkning av accepterade deponeringspositioner	38
7.2 Program	39
7.2.1 Hydrogeologi	40
7.2.2 Bergmekanik	40
7.2.3 Strukturgeologi	41
7.2.4 Beräkning av accepterade kapselpositioner	41

	Sida
8 Borring	43
8.1 Kunskapsläge	44
8.1.1 Borringsteknik	44
8.1.2 Borrprestanda	50
8.1.3 Erfarenheter av borrutrustningar	50
8.1.4 Jämförelse av bormetoder	51
8.2 Program	53
9 Injektering och förstärkning	55
9.1 Kunskapsläge	55
9.1.1 Injektering	55
9.1.2 Förstärkning	57
9.2 Program	57
9.2.1 Injektering	57
9.2.2 Förstärkning	59
10 Deponeringsteknik	61
10.1 Kunskapsläge	62
10.1.1 Omlastning och paketering	62
10.1.2 Transport i tunneln	64
10.1.3 Deponering	65
10.2 Program	67
11 Pluggning av deponeringshål	69
11.1 Kunskapsläge	69
11.1.1 Pluggar under deponeringen	69
11.1.2 Pluggar efter avslutad deponering	69
11.2 Program	71
12 Återtag	73
12.1 Kunskapsläge	73
12.1.1 Teknik för reversering	74
12.1.2 Teknik för friläggning	74
12.2 Program	76
13 Resurser	79
14 Slutsatser	81
Referenser	83

1 Inledning

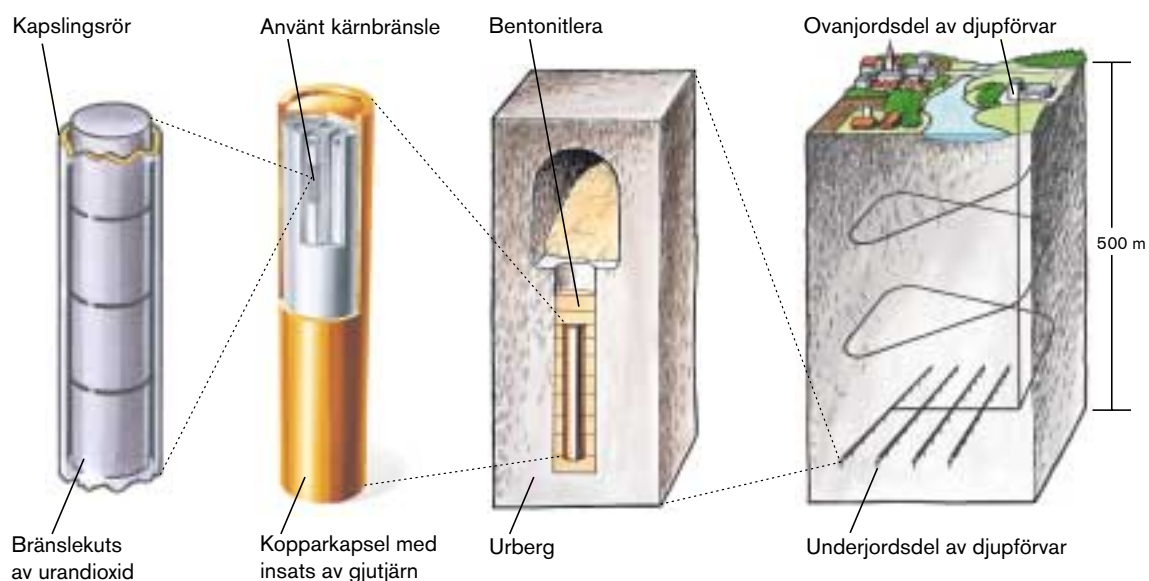
1.1 Bakgrund

I mitten av 1970-talet påbörjades utvecklingen av ett system för inkapsling och slutförvaring av det använda kärnbränslet från de svenska kärnkraftverken. Arbetet resulterade under perioden 1977 till 1983 i en serie rapporter, som successivt koncentrerades på att det använda kärnbränslet skulle kapslas in i kopparkapslar och deponeras på ungefär 500 meters djup i kristallin berggrund /1/. Resultatet, den så kallade KBS-3-metoden, har sedan dess utgjort SKB:s referenskoncept. Figur 1-1 visar en principskiss av referensutformningen, ett KBS-3-förvar med vertikal deponering.

Efter 1984 har SKB utvecklat och utvärderat några andra intressanta alternativ till och varianter av referensutformningen. Till dessa hör en variant där flera kapslar deponeras horisontellt i varje deponeringshål. I referensutformningen deponeras en kapsel vertikalt i varje deponeringshål, se figur 1-2, medan den horisontella varianten innebär att kapslarna i stället deponeras efter varandra i 200–250 meter långa deponeringshål, se figur 1-3. Kapslarna är likadana i de båda förvarsvarianterna. Även de omgivande bentonitblocken är identiska.

SKB har tidigare jämfört de båda varianterna i PASS- (Projekt Alternativstudier för Slutförvar) och JADE-projekten (Jämförelse Av DEponeringsmetoder) /2,3/.

Som framgår av principskisserna finns det inga deponeringstunnlar i ett förvar med horisontell deponering av flera kapslar i ett deponeringshål. Deponeringshålen utgår i stället direkt från transporttunnlarna. Detta innebär att den totalt uttagna bergmassan blir mycket mindre än för referensutformningen KBS-3-förvar med vertikal deponering.



Figur 1-1. KBS-3-metoden bygger på att flera barriärer samverkar för att hindra de radioaktiva ämnena i bränslet från att med grundvattnets hjälp transporteras upp till markytan och där spridas i biosfären. Figuren visar SKB:s referensutformning med vertikal deponering.



Figur 1-2. Referensutformning av KBS-3-metoden med vertikal deponering.



Figur 1-3. KBS-3-metoden där kapslarna deponeras horisontellt efter varandra i 200–250 meter långa deponeringshåll. Utformningen innebär att de deponeringstunnlar, som finns i referensutformningen inte behövs.

Därmed sänks kostnaderna för att bygga förvaret. Även miljöpåverkan blir mindre, eftersom utsläppen till luft från sprängning och från transporter av sprängmassor kan antas vara direkt proportionell mot volymen uttaget berg. Utvecklingen av maskiner och teknik för ett förvar med horisontell deponering har emellertid inte kommit lika långt som i fallet med referensutformningen och inga demonstrationsförsök har gjorts.

1.2 Vilka krav finns på ett förvar för använt kärnbränsle?

Oavsett hur ett förvar för använt kärnbränsle kommer att utformas i slutändan finns en rad krav som måste uppfyllas. Kraven regleras i lagar, föreskrifter och internationella konventioner. I den svenska lagstiftningen är miljöbalken, kärntekniklagen och strålskyddslagen speciellt viktiga. För att få bygga ett geologiskt förvar krävs tillstånd enligt både miljöbalken och kärntekniklagen.

Miljöbalken /4/ reglerar bland annat frågor om hur tillåtlighetsprövningen vid lokaliseringen av ett geologiskt förvar ska gå till och hur miljökonsekvensbeskrivningen ska upprättas. Miljöbalken reglerar också vilken miljöpåverkan, förutom från joniserande strålning, som kan tillåtas från anläggningen.

Kraven på säkerhet och strålskydd utgår från kärnteknik- och strålskyddslagen. Kärntekniklagen /5/ stadgar allmänt att kärnteknisk verksamhet ska bedrivas på ett säkert sätt. Strålskyddslagen /6/ föreskriver att den som bedriver verksamhet med strålning ska, med hänsyn till verksamhetens art och de förhållanden under vilka den bedrivs, vidta erforderliga åtgärder och försiktighetsmått för att hindra skador på människor, djur och miljö.

Till kärntekniklagen och strålskyddslagen finns av regeringen utfärdade förordningar /7,8/, som innebär en viss detaljering och reglerar SKI:s och SSI:s verksamheter. De är dock mycket allmänt hållna beträffande krav på djupförvarets säkerhet och strålskydd. Förordningarna ger SKI och SSI rätt att utfärda föreskrifter.

SSI har utfärdat föreskrifter om slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle /9/. Föreskrifterna anger att det slutliga omhändertagandet ska vara strålskyddsmässigt optimerat och utgå från bästa tillgängliga teknik. Ett slutförvar ska utformas på ett sådant sätt att den årliga risken för skadeverkningar efter förslutning blir högst 10^{-6} för en representativ individ i den grupp som utsätts för den största risken. Dessutom ska ett slutligt omhändertagande genomföras så att den biologiska mångfalden bevaras och så att de biologiska resurserna utnyttjas på ett hållbart sätt samt skyddas mot strålning.

SKI har skickat ut ett förslag till föreskrifter om säkerhet vid slutförvaring av använt kärnbränsle /10/. Där framhålls att säkerheten, både på lång och kort sikt, ska baseras på ett system av passiva barriärer och att en brist, som kan uppkomma i en av barriärerna, inte påtagligt får försämra slutförvarets säkerhet. I förslaget sägs vidare att förhållanden, händelser och processer som har betydelse för säkerheten hos ett djupförvar efter förslutning ska analyseras innan:

- Förvaret uppförs.
- Förvaret tas i drift.
- Förvaret försluts.

Huruvida de grundläggande kraven är uppfyllda på en specifik plats eller inte prövas i samband med att myndigheterna granskar de säkerhetsanalyser och miljökonsekvensbeskrivningar som SKB är skyldiga att redovisa.

Kraven i den svenska lagstiftningen utgår från den internationella överenskommelse Joint Convention on Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management /11/ som Sverige har ratificerat. Denna har dock inte börjat gälla ännu, eftersom inte tillräckligt många länder har ratificerat den.

År 1984 fann regeringen att KBS-3-metoden med vertikal deponering ”i sin helhet i allt väsentligt befunnits kunna godtas med hänsyn till säkerhet och strålskydd”. Därmed var ett av kraven i kärntekniklagen uppfyllt för att laddningstillstånd för reaktorerna Oskarshamn 3 och Forsmark 3. Även ett KBS-3-förvar med horisontell deponering av flera kapslar i samma deponeringshål torde kunna uppfylla lagkraven ur dessa aspekter, eftersom det endast är en variant av KBS-3-metoden och bygger på samma säkerhetsprinciper.

2 Horisontell deponering

2.1 Tidigare utredningar

Utformningen av ett KBS-3-förvar bygger på kunskaper om svensk kristallin berggrund på 400–700 meters djup samt på de erfarenheter som SKB fått genom undersökningar av olika typområden och från Äspölaboratoriet. Layouten är än så länge generell. I takt med att kunskapen om berget förbättras under först platsundersökningarna och senare ytterligare fördjupas under detaljundersökningen kommer platsens förutsättningar för lokalisering av ett djupförvar att klargöras successivt och ge underlag för en mera detaljerad layout. Den slutliga utformningen fastställs i samband med detaljundersökningen, men detaljanpassningen med hänsyn tagen till de geologiska förhållandena kan i viss utsträckning även göras under byggtiden.

Horisontell eller vertikal deponering är en sådan frihetsgrad som ännu inte har låsts. I detta kapitel ges en kortfattad redogörelse för SKB:s tidigare utredningar i ämnet. Kapitlet innehåller också en översikt över utländska erfarenheter av horisontell deponering.

2.1.1 PASS-projektet

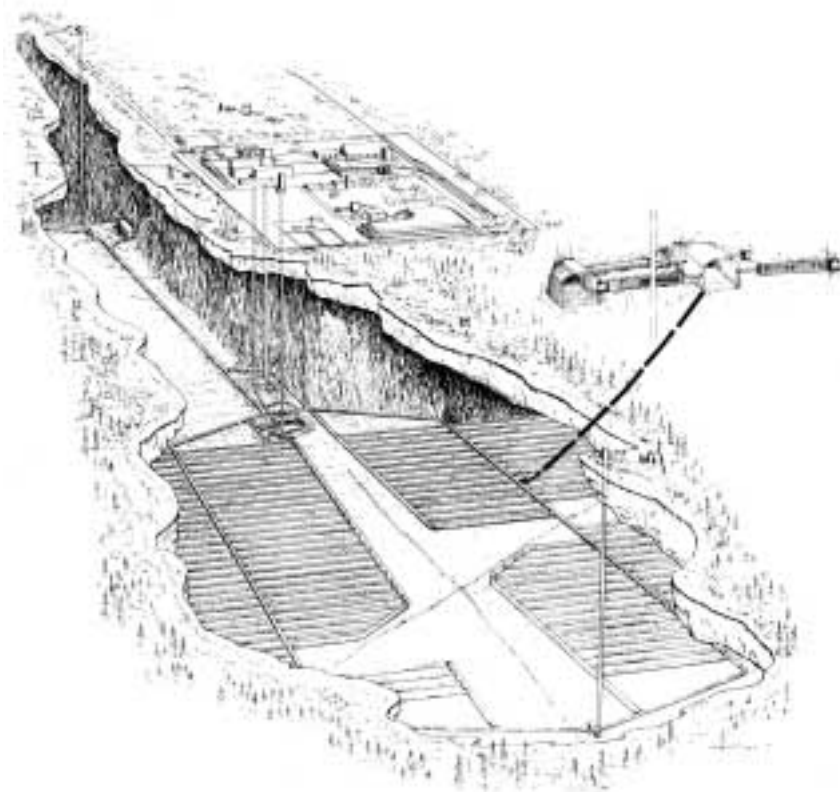
I PASS-projektet /2/ 1992 analyseras och jämförs referensmetoden, horisontell deponering med flera kapslar i samma deponeringshål, långa tunnlar och djupa borrhål. Jämförelsen omfattar både kapselutformning och deponeringsmetod, varvid jämförelsen av deponeringsmetod delades upp i tre delar:

- Långsiktig funktion.
- Teknik.
- Kostnader.

Resultatet av jämförelsen blev att referensmetoden och horisontell deponering med flera kapslar i samma deponeringshål rankades högre än de andra metoderna. Referensmetoden bedömdes vara bättre när det gäller teknisk tillförlitlighet och även vara mer flexibel för deponeringsprocessen. Horisontell deponering med flera kapslar i samma deponeringshål ansågs vara kostnadseffektivare, men har en mer komplicerade deponeringsprocess vilket ledde till att den slutliga bedömningen vägde över till fördel för referensutformningen.

Anläggningsutformning

Djupförvaret förutsätts vara beläget på 500 meters djup under markytan. Det nås från markytan via ramp och/eller hisschakt. Enligt det förslag som togs fram i PASS-projektet består deponeringsområdet av ett antal parallella deponeringshål, som står i förbindelse med en centraltunnel och en sidotunnel. Därtill ingår transporttunnlar, serviceutrymmen och ventilationsutrymmen, se figur 2-1. Deponeringshålen skulle enligt förslaget borras med horisontell stigortsborrning och extra sidotunnlar krävdes.



Figur 2-1. KBS-3-förvar enligt PASS.

Värt att notera är att man i PASS-projektet utgick från en kapsel som har en yttre diameter av 0,88 meter. Detta ska jämföras med dagens kapsel som har en yttre diameter av 1,05 meter. Ändringen i diameter beror på att kapselinsatsen numera består av gjutjärn i stället för ett stålrör som fylldes med sand eller glaskulor. Bentonitens tjocklek är däremot oförändrad och uppgår till 0,35 meter när den är fullt vattenmättad. Deponeringshålens diameter i PASS-rapporten uppgår till 1,6 meter.

Deponeringsteknik

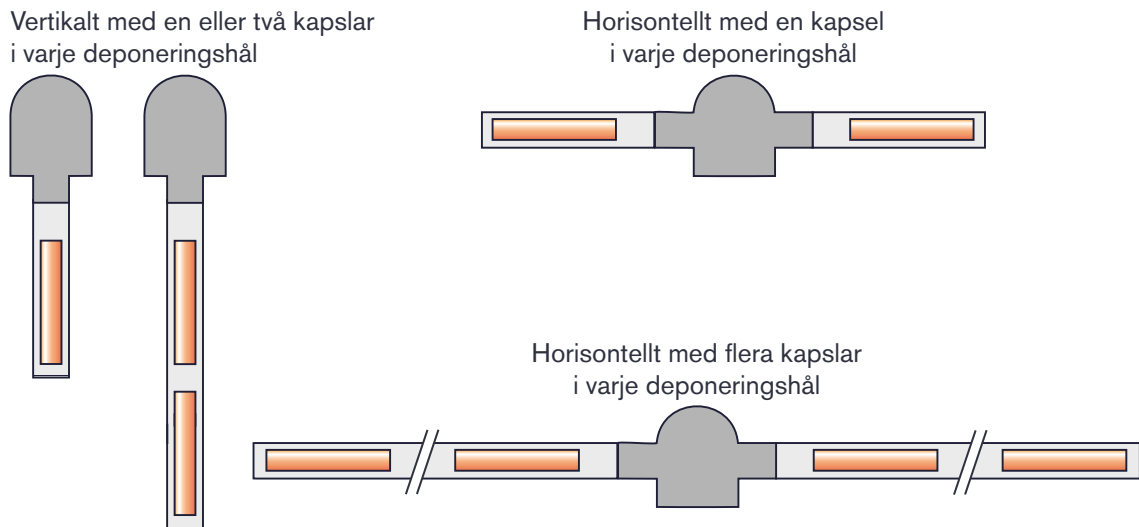
Enligt PASS-projektet förslag skulle deponeringen ske i två steg. Hela bentonitbufferten placeras i ett moment och kapseln skjuts in i det centrala hålet i bufferten i ett andra moment.

2.1.2 JADE-projektet

1996 initierade SKB genom JADE-projektet /3/ en ny och detaljerad jämförelse mellan vertikal och horisontell deponering. Anledningen till detta var att de tekniska förutsättningarna förändrats sedan PASS-studien.

Jämförelsen omfattar de tre varianter av KBS-3-metoden, se figur 2-2:

- KBS-3 med vertikal deponering av en kapsel är referensmetoden i jämförelsen. Kapseln placeras i ett vertikalt deponeringshål i golvet på deponeringstunneln. Möjligheten att deponera två kapslar i varje deponeringshål studeras också.
- KBS-3 med horisontell deponering av en kapsel i varje deponeringshål. Kapseln placeras i ett horisontellt hål i deponeringstunnelns vägg.



Figur 2-2. Deponeringsmetoder som jämförs i JADE-rapporten.

- KBS-3 med horisontell deponering av flera kapslar i varje deponeringshål består av cirka 250 meter långa horisontella deponeringshål borrade i väggen av en transporttunnel. Kapslarna deponeras i rad efter varandra i positioner som separeras med kompakterad bentonit.

Stora delar av djupförvaret är lika för alla tre förvarsvarianterna, t ex ovanjordsanläggningen, centralområdet samt en del av transporttunnlarna. Jämförelsen i JADE avser säkerhet /12/, teknik /13/ och kostnader /14/ och är därför begränsad till transport- och deponeringstunnlar samt deponeringshål.

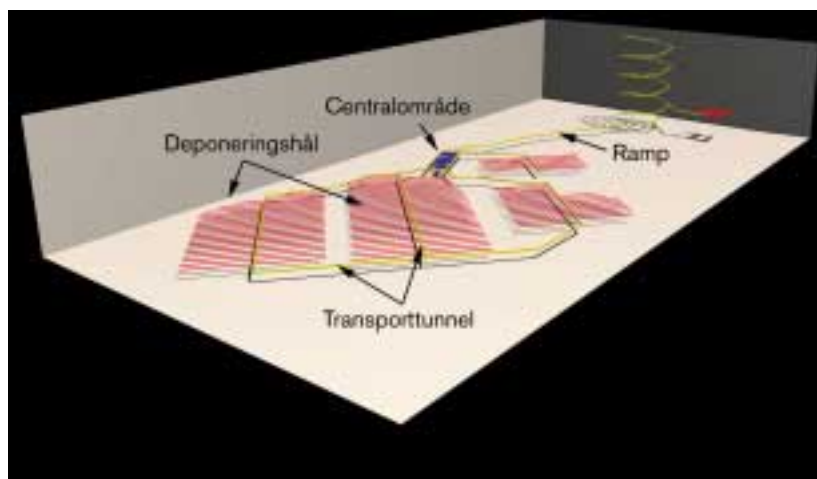
Målet med JADE-projektet var att utreda om ytterligare någon deponeringsmetod utöver referensmetoden skulle kunna finnas med när platsspecifika val görs efter de inledande platsundersökningarna. Utredningen visade att samtliga metoder bedömdes som tekniskt genomförbara, men att KBS-3 med horisontell deponering av flera kapslar i varje deponeringshål är att föredra jämfört med KBS-3 med horisontell deponering av en kapsel i varje deponeringshål. Vertikal deponering med två kapslar per deponeringshål ger inga direkta fördelar, eftersom avståndet mellan deponeringshålen i stort sett måste fördubblas.

Anläggningsutformning

Deponeringsområdet kommer att anpassas efter lokala förhållanden i fråga om bergblockens utseende och egenskaper. Utbredningen av förvaret bestäms framför allt av värmeutvecklingen i det använda bränslet och av hur många kapselpositioner som faller bort på grund av att de bedöms vara olämpliga.

Utvecklingen av TBM-tekniken för borrning av horisontella tunnlar har gjort att behovet av sidotunnlar försvunnit. I det förslag till anläggningsutformning för ett KBS-3-förvar med horisontell deponering av flera kapslar i samma deponeringshål som presenteras i JADE-rapporten finns därför inga sådana. Se figur 2-3.

Deponeringshålen är 200–250 meter långa och har en diameter av 1,75 meter. Avståndet mellan hålen har beräknats till 40 meter och avståndet mellan kapslarna till 1,2 meter. Det som styr avståndet mellan kapslarna är att temperaturen på kapselns utsida inte får överstiga 100 °C.



Figur 2-3. KBS-3-förvar med horisontell deponering av flera kapslar i samma deponeringshål enligt JADE.

Deponeringsteknik

I JADE-projektet gjordes en genomgång av olika deponeringsmetoder /15/, både sådana där bentonit och kapsel deponeras separat och sådana där hela paket med kapsel och bentonit deponeras. Projektets bedömning var att metoder där deponeringen sker genom att hela paket förs in i tunnlar med hjälp av en specialbyggd deponeringsmaskin har den största utvecklingspotentialen.

Paketen består av kapsel och bentonitblock omgivna av ett perforerat stödjande skyddsrör. Placeringen av bentonitbufferten bygger på fjärrmanövrerad teknik med små utrymmen mellan utrustning och bergvägg. Deponeringen måste ske i sekvens utan avbrott, eftersom det inkommande vattenflödet gör att bentoniten börjar svälla.

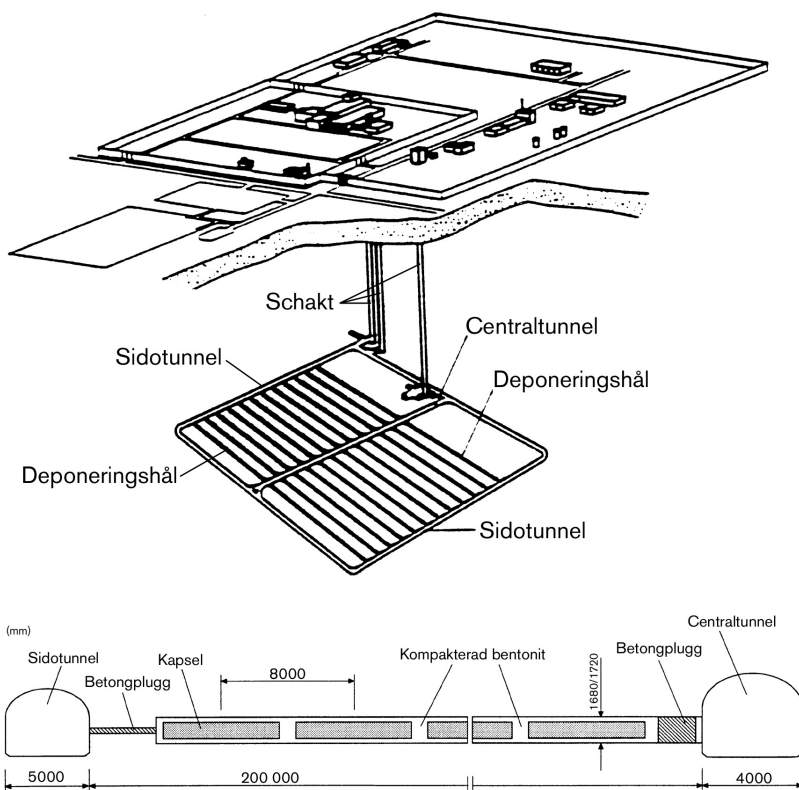
2.2 Utländska erfarenheter av horisontell deponering

2.2.1 Finland

I Finland finns två kärnkraftverk, Olkiluoto och Lovisa, med vardera två reaktorer. Med en beräknad drifttid på 40 år kommer det finska kärnkraftprogrammet att ge upphov till omkring 2 600 ton använt bränsle. Det finska referensmetoden bygger liksom den svenska på KBS-3-metoden. Platsundersökningar har genomförts på fyra platser. Enligt planerna kommer detaljundersökningar att påbörjas år 2003 i Olkiluoto.

SKB:s finska systerorganisation Posiva genomförde 1996 en utvärdering av olika deponeringsvarianter /16/. En av dessa var horisontell deponering. Det finska förslaget liknar mycket den utformning som presenterades i PASS-rapporten, se figur 2-4, men tillredningen av deponeringshålen sker genom horisontell stigortsborrning. PASS-projektet genomfördes i samarbete mellan SKB och Posiva.

Deponeringshålen antas vara 200 meter långa med ett inbördes avstånd av 25 meter. Hålens diameter är 1,68 meter eller 1,72 meter, beroende på hur stort utrymme man vill ha mellan bufferten och den omgivande bergväggen. De tekniska detaljerna för det finska KBS-3-förvaret med horisontell deponering presenteras i tabell 2-1.



Figur 2-4. KBS-3 med horisontell deponering enligt Posiva.

Tabell 2-1. Tekniska data om det finska KBS-3-förvaret med horisontell deponering.

Schakt (antal, volym)	3 st, 31 660 m ³
Tillredningsmetod för sidotunnlar	Konventionell borrhning och sprängning
Sidotunnlar (längd, volym)	2 700 m, 50 000 m ³
Tillredningsmetod för deponeringshål	Horisontell stigortsborrning
Deponeringshål c/c	25,0 m
Avstånd mellan kapslar c/c	8,0 m
Deponeringshålens totala längd	14 650 m
Deponeringshål (antal, volym)	73 st, 32 400 m ³
Övriga utrymmen, volym	94 380 m ³
Total volym	208 440 m ³
Förvarets totalarea	335 000 m ³

Deponeringen föreslås gå till så att ringformade block av högkompakterad bentonit först placeras i deponeringshålet, varefter kapseln skjuts in i hålet, se figur 2-5. Efter det att kapseln kommit på plats avskiljs den deponerade kapseln från nästa kapsel genom en 3,50 eller 4,45 meter lång bentonitplugg. Pluggens längd beror på om det rör sig om bränsle från kokvattenreaktorer eller bränsle från tryckvattenreaktorer av VVER-typ.

Deponeringen blir svårare att genomföra än i ett KBS-3-förvar med vertikal deponering, eftersom varje kapsel måste skjutas in i hålet innan bentoniten svällt för mycket. I ett 200 meter långt hål ska omkring 25 kapslar deponeras. Posiva räknar med att det tar två



Figur 2-5. Principen för deponering där 1) visar inplacering av kapseln i bufferten, 2) visar installation av en bentonitplugg och 3) visar installation av den cylindriska bufferten, varefter en ny deponeringscykel kan inledas.

dagar att deponera en kapsel, vilket innebär att deponeringen i en enda tunnel skulle pågå i 50 dagar utan uppehåll.

Kostnaden för ett finskt KBS-3-förvar med horisontell deponering med flera kapslar i samma deponeringshål beräknas bli 98 MFIM lägre än för ett motsvarande KBS-3-förvar med vertikal deponering. Osäkerheterna är emellertid mycket stora och om dessa inkluderades skulle ett KBS-3-förvar med horisontell deponering av flera kapslar i samma deponeringshål till och med kunna bli något dyrare än ett KBS-3-förvar med vertikal deponering. Att skillnaderna i kostnader inte blir lika stora som i det svenska programmet beror på att mängden bränsle som genereras i det finska kärnkraftsprogrammet är mindre. Därmed blir också den inbesparade tunnelvolymen mindre.

I samband med att detaljundersökningarna påbörjas år 2003 måste Posiva visa att det finns alternativ till KBS-3-metoden. KBS-3 med vertikal deponering medför att en stor bergvolym tas ut och detta kan leda till att vatten med hög salthalt tränger upp underifrån till förvarsnivå. För höga salthalter kan leda till att det inte går att uppnå tillräcklig svällningsförmåga hos bentoniten i återfyllnadsmaterialet för deponeringstunnlarna eller till att en stor mängd bentonit behövs där. En uppdatering av den föregående studien av horisontell deponering planeras att genomföras. Bland annat kommer slutsatserna från den finska säkerhetsanalysen TILA /17/ att vägas in.

2.2.2 Spanien

I Spanien finns nio reaktorer. Det uppkomna bränslet mellanlagras i bassänger vid kärnkraftverken. En mindre mängd har upparbetats i Frankrike. Om reaktorerna drivs i 40 år uppkommer 6 850 ton använt kärnbränsle och 200 kubikmeter högaktivt förglasat avfall.

Fram till 1983 var tanken att allt använt kärnbränsle skulle upparbetas. Denna linje övergavs av ekonomiska skäl till förmån för direktdeponering. För närvarande råder osäkerhet om den framtida inriktningen. En rad forsknings- och utvecklingsprojekt pågår

inom såväl uppärbetning och transmutation som direktdeponering. Dessa beskrivs närmare i den spanska organisationen Enresas senaste forskningsprogram /18/. År 2010 är det meningen att så mycket underlag ska finnas framme så att regeringen kan fatta ett beslut om hur bränslet och restprodukterna från uppärbetningen ska tas om hand.

I Spanien finns lämpliga geologiska formationer av såväl salt som lera och granit. Alla tre medierna har studerats. Saltformationerna ligger emellertid i socioekonomiskt olämpliga områden och avskrevs därför i mitten av 1990-talet. Lera och granit kvarstår som möjliga alternativ. Något direkt arbete med platsval har dock inte gjorts under de senaste två till tre åren.

Referenskonceptet

Enresas referenskapsel består av stål och har en ytterdiameter av 900 mm och en längd av 4 540 mm. Kapselns vägg tjocklek är 100 mm, vilket beräknas ge en livslängd av minst 1 000 år. Lock och botten har en tjocklek av 150 mm. Kapseln är dimensionerad för 5 MPa svälltryck plus det hydrostatiska trycket. Tanken är att samma kapsel ska användas oavsett geologiskt medium.

Bufferten består av bentonitblock som läggs på plats separat med hjälp av en rälsgående robot. Rälserna kan plockas bort efter avslutad deponering om så önskas. Ett foderrör mellan berget och bufferten kan bli aktuellt, men detta bestäms av de platspecifika förhållandena.

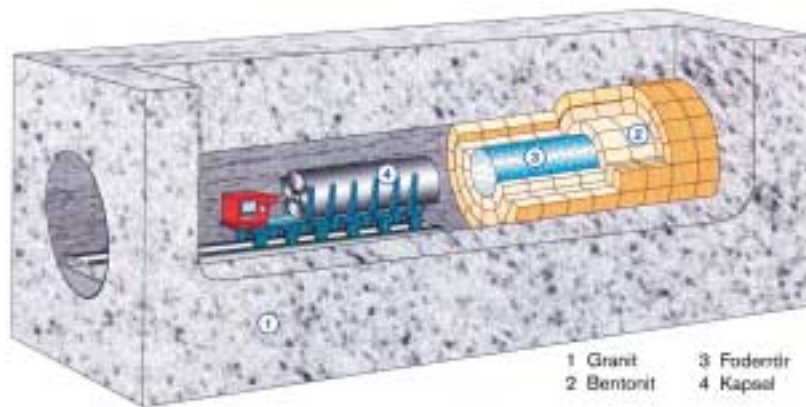
När bufferten för en kapsel har byggts upp dras den rälsgående roboten ut och en cirkulär strålskyddssluss fästs framför buffertens centrum. Slussen öppnas och man kör in en vagn med en kapsel i en strålskyddstube. När kapseln ligger på plats inne i bufferten kan strålskyddsslussen stängas och tuben köras ut. Buffertroboten kommer tillbaka, tar bort strålskyddsslussen och bygger upp den resterande buffertpluggen på en meter. Därefter bygger den upp bufferten för nästa kapsel. Deponering och drivning av ytterligare tunnlar förutsätts kunna pågå samtidigt.

Deponeringsområdet kommer enligt planerna att ligga på cirka 500 meters djup. I Spanien finns områden med mycket stora bergblock och låga horisontalspänningar. Referenskonceptet utgår från att deponeringshålen är 500 meter långa och har en diameter av 2,40 meter. Avståndet mellan hålen är 35 meter och avståndet mellan kapslarna en meter. Med en utgångstemperatur av 13 °C i berget ger detta en maximal temperatur hos bufferten på 100 °C.

FEBEX-försöket

FEBEX-försöket i det schweiziska underjordiska berglaboratoriet i Grimsel /19/ avser att reproducera de verkliga förhållandena i ett djupförvar. Diametern på deponeringshålet skiljer sig dock från referenskonceptets diameter och uppgår här till 2,28 meter. Anledningen till detta är att man ville använda sig av en kommersiellt tillgänglig bormaskin och inte utveckla en ny speciellt för försöket. Deponeringshålet i Grimsel är 17,4 meter långt och innehåller två deponerade referenskapslar som är försedda med elektriska värmare, se figur 2-6.

Bufferten har byggts upp manuellt av högtryckspressade bentonitblock. I centrum av bufferten finns ett perforerat foderrör för att underlätta inplaceringen av kapslarna. Foderröret tillverkades i bitar av en meter, vilket ledde till att man fick problem med raketeten vid inskjutningen. Foderrörets diameter är 940 mm.



Figur 2-6. FEBEX-försöket i Grimsel startade 1995 med geologiska undersökningar och tunnelbygge. De elektriska värmarna slogs på 1997.

Placeringen av bentonitblocken kunde genomföras utan problem sedan luftfuktigheten justerats. Denna måste uppgå till 70 procent.

Bufferten är uppbyggd av i princip tre radiella ringar med bentonit. Den fria volymen beräknades till 5 procent, men mättes upp till 6,06 procent. Ett radiellt gap kunde inte undvikas mellan blocken plus att det i taket uppstod ett gap på 4-5 cm. Detta medförde att den beräknade tätheten i bufferten på 1 700 kg/m³ blev 1 600 kg/m³ i realiteten. I axiell led uppstod inga gap mellan blocken. Sommaren 2001 var den yttersta ringen nästan vattenmättad, medan den innersta var torrare än när de elektriska värmarna slogs på 1997.

Omkring 600 mätgivare har installerats. Det har visat sig vara lätt att mäta temperatur och fukthalt, men däremot ytterst svårt att mäta totaltrycket.

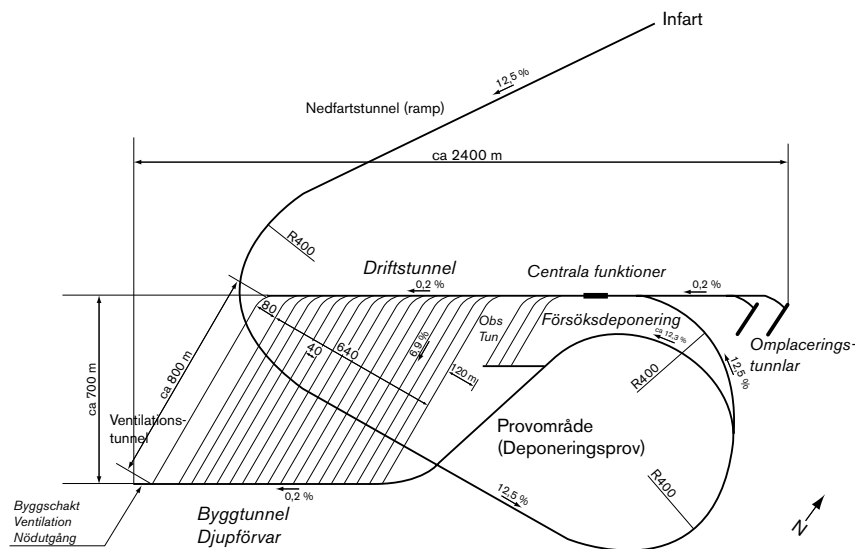
Försöksområdet har förslutits med hjälp av en betongplugg. Denna är inte armerad och det finns ingen slits i bergväggen. Friktionen håller pluggen på plats. Bentonitens svälltryck på pluggen uppgår till omkring 6 MPa, vilket närmar sig det beräknade friktionsvärdet. Ett visst vattenläckage genom pluggen har noterats.

Enligt planerna skulle den yttre kapseln i försöket grävas ut och tas bort under sommaren 2001. Experimentet har emellertid förlängts till april år 2002. Därefter fortsätter försöket med endast en kapsel. En ny betongplugg ska också uppföras.

2.2.3 Schweiz

Det schweiziska programmets fem reaktorer beräknas ge upphov till 3 000 ton använt kärnbränsle. En del av detta upparbetas i Storbritannien och Frankrike, varför ett schweiziskt slutförvar också måste kunna härbärgera både använt kärnbränsle och högaktiva upparbetningsrester.

De första inledande översiktsstudierna för att finna en lämplig plats för ett förvar gjordes under 1980-talet. Undersökningarna fokuserade på granitformationer i norra Schweiz och vertikal deponering. Detta så kallade projekt Gewähr /20/ avslutades 1985. Den schweiziska genomförarorganisationen Nagra kunde då konstatera att:



Figur 2-7. Det schweiziska referenskonceptet.

- Metoden är dyrbar.
- Utrustningen som krävs för att deponera kapseln blir komplicerad.
- Det är svårt att hålla deponeringshålet tillräckligt torrt för att genomföra deponeringen och den efterföljande återfyllningen utan att förlora tätheten i bufferten.

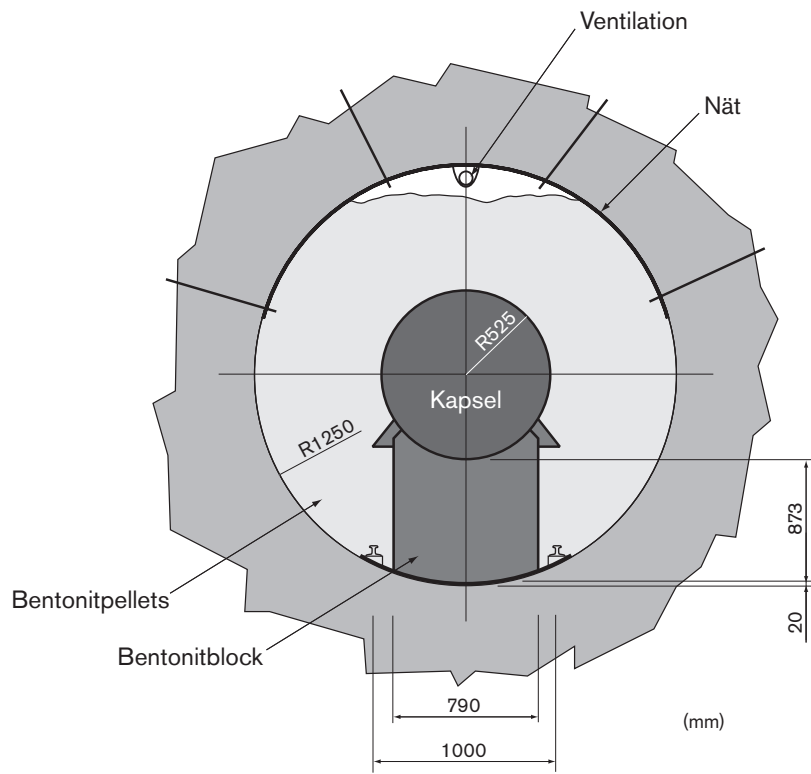
Efter denna erfarenhet började Nagra intressera sig för sedimentära bergarter och horisontell deponering. I Zürcher Weinland i norra Schweiz finns nära nog horisontella lerlager på 450–850 meters djup. Tjockleken varierar mellan 100 och 120 meter. Att lerlagren är horisontella tyder på att området varit förskonat från rörelser i jordskorpan och därför borde vara en mycket bra plats för ett förvar för högaktivt avfall och använt bränsle. Lerformationen är mycket tät. Den hydrauliska konduktiviteten uppgår till 10^{-13} m/s.

Nagras referenskoncept [21] är nu deponering i 800 meter långa tunnlar med en diameter på 2,5 meter, se figur 2-7. Tunnlarna ligger centrerade i lerlagret och lutar svagt. Avståndet mellan tunnlarna uppgår till 40 meter. I referenskonceptet är kapseln av stål, men koppar kan också vara ett tänkbart alternativ. Varje kapsel har en resteffekt av 1 500 W (vid 50 MWd och 40 års avklingning). Temperaturen på förvarsnivå är ungefär 30 °C, vilket innebär att kapselns ytemperatur kommer att ligga runt 150 °C.

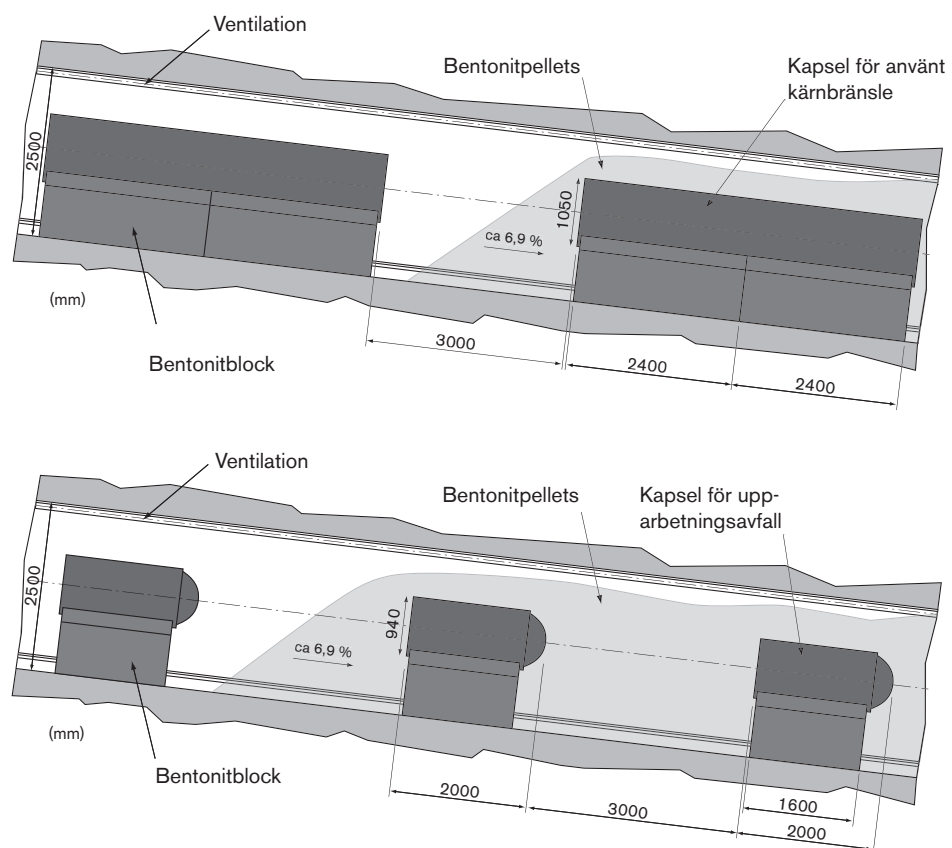
Transporten av kapslar ner i förvaret sker med hjälp av spårbundna fordon. Vid en omlastningsstation förs kapseln över till ett specialbyggt transportfordon som sedan placerar kapseln på plats i deponeringshålet.

Kapseln placeras på ett block av högkompakterad bentonit och är centrerad i tunneln, se figur 2-8. Hela utrymmet runt kapseln fylls därefter med bentonitpellets, se figur 2-9. Den höga temperaturen innebär att bentoniten närmast kapseln kommer att omvandlas. Att så sker anses dock inte ha så stor betydelse, eftersom buffertens tjocklek är väl tilltagen. Förvaret nås via en tillfartsramp med lutningen 12,5 procent (1:8).

Återtag anses vara möjlig genom en kombination av utgrävning och borrning.



Figur 2-8. Kapslarna är placerade på block av högkompakterad bentonit.



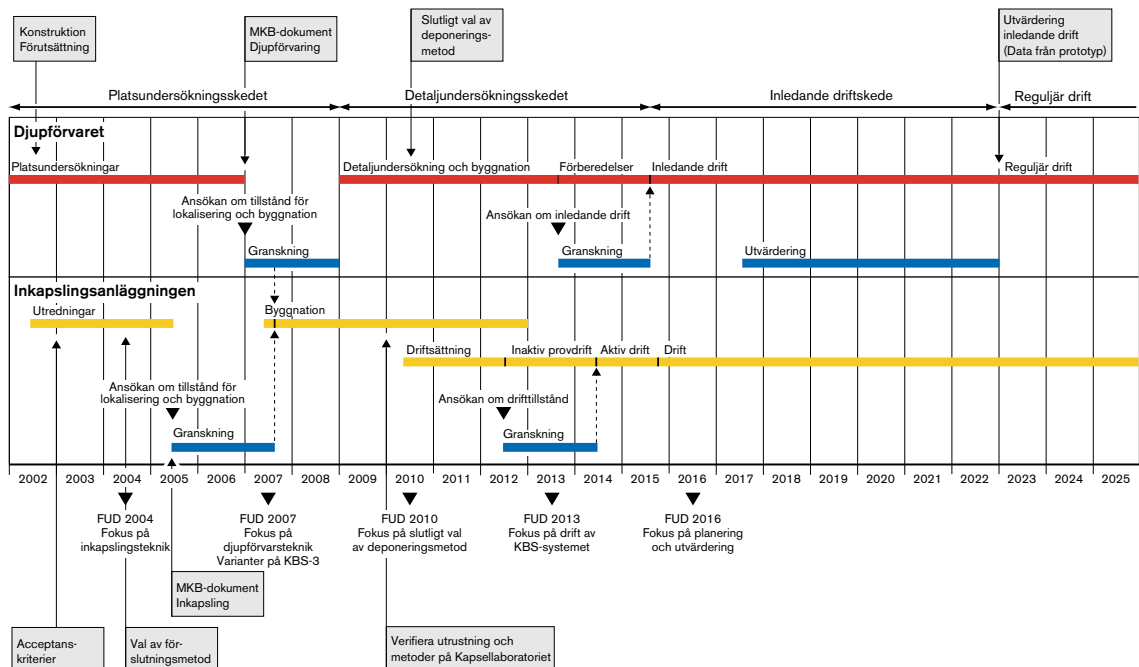
Figur 2-9. Återfyllning av tunnlar.

3 FUD-programmets uppbyggnad

Hittills har det inte funnits någon samlad bild av vad det skulle krävas för resurser i form av tid och pengar för att lyfta kunskapsnivån för horisontell deponering av flera kapslar i samma deponeringshål till samma nivå som för vertikal deponering. Syftet med denna rapport är att redovisa ett forsknings-, utvecklings- och demonstrationsprogram som besvarar dessa frågor och som också kan fungera som ett underlag för ett eventuellt beslut om fortsatta utvecklingsinsatser när det gäller horisontell deponering av flera kapslar i samma deponeringshål. För enkelhetens skull benämns denna förvarsvariant i fortsättningen horisontell deponering.

3.1 Stegvis genomförande

Tidigare studier och jämförelser har visat att skillnaderna mellan referensutförningen och ett förvar med horisontell deponering är både av platsspecifik och generell karaktär. För att få en ordentlig återkoppling av resultat från platsundersökningarna och senare även detaljundersökningar bör programmet i största möjliga utsträckning kopplas till SKB:s nuvarande planering för att bygga djupförvaret, se figur 3-1.



Figur 3-1. SKB:s referenstidsplan för byggandet av djupförvaret och inkapslingsanläggningen.

En sådan koppling torde också ge synergieffekter även när det gäller frågeställningar av generell karaktär. Utgångspunkten för planeringen är att FUD-arbetet indelas i följande steg:

- Förstudie (2002).
- Konceptuell utformning (2003).
- Genomförande (2004–2008).
- Utvärdering (2009–2010).

Varje skede bör avslutas med en kontrollstation där SKB gör en samlad bedömning av om och i så fall hur horisontell deponering ska utvecklas i ytterligare ett steg. Den stegvisa beslutsgången innebär att beslutsunderlaget baseras på teknisk och platspecifik geologisk information med ständigt ökande detaljeringsgrad.

3.2 Struktur

Programmet består av följande delområden:

- Förvarsutformning (kapitel 4).
- Säkerhetsanalys (kapitel 5).
- Buffert (kapitel 6).
- Geovetenskap (kapitel 7).
- Borrning (kapitel 8).
- Injektering/förstärkning (kapitel 9).
- Deponeringsteknik (kapitel 10).
- Pluggning av deponeringshål (kapitel 11).
- Återtag (kapitel 12).

I kapitel 4–12 följer detaljerade redovisningar av programmen. Varje kapitel inleds med en sammanfattande redovisning av kunskapsläget och avslutas med ett programförslag. Kapitel 13 redovisar resursåtgången i form av tid och kostnader. Slutsatserna diskuteras i kapitel 14.

4 Förvarsutformning

Inom ramen för detta projekt har idéerna från JADE-projektet utvecklats ytterligare. Nya förslag till utformning av deponeringsbehållaren och deponeringsmaskinen har tagits fram, se vidare kapitel 10. Dessutom har inventeringen av tillgängliga borrhutrustningar visat att clusterborrning med vattenhammare kan vara ett intressant alternativ vid bygge av ett KBS-3-förvar med horisontell deponering, se kapitel 8.

Utformningen av djupförvarets undermarksanläggning påverkas av platsspecifika förhållanden. Generellt blir skillnaderna mellan vertikal och horisontell deponering små.

Platsanpassningen påverkas av berggrundens:

- Bergmekaniska egenskaper.
- Termiska egenskaper.
- Hydrauliska egenskaper.
- Grundvattenkemi.

Bergmekaniken har liten betydelse för spänningarna inom området elastisk respons som i Äspö motsvarar ett djup av cirka 400 meter. Bergspänningarnas betydelse ökar dock med djupet och påverkar då tunnelorientering, tunnelformer, hela förvarslayouten samt förvarsdjupet.

Berggrundens termiska egenskaper påverkar layouten och har marginellt ökad betydelse med djupet.

De hydrauliska egenskaperna kan ha både positiva (minskad permeabilitet) och negativ effekt (ökat tryck) med förvarsdjupet. De hydrauliska förhållandena har betydelse för tunnelorientering, förvarslayout och förvarsdjup.

Grundvattenkemin har betydelse för buffertens integritet och påverkas av förvarsdjupet.

Vid platsanpassningen måste en optimering ske mellan dessa egenskaper i berggrunden vid förvarsplatsen.

Anläggningar ovan mark påverkas i princip inte. Bortfallet av deponeringstunnlar medför att mängden utsprängt berg minskar med cirka 50 procent. Behovet av massor för återfyllnad av transporttunnlar, bergrum i centraldelen, ramp och schakt uppstår först när den reguljära driften är avslutad och anläggningen ska förslutas.

Undermarksanläggningens centraldel påverkas endast marginellt, men omlastningsstationen får en något annorlunda utformning för att färdigställa deponeringsbehållaren. Övriga funktioner påverkas inte. Dimensionen på transporttunnlarna kommer att optimeras med avseende på kraven från den utrustning som kommer till användning.

4.1 Kunskapsläge

Förvarets utformning kan varieras med avseende på tunnlarnas riktning. I referensutformningen utgår deponeringstunnlarna vinkelrätt från transporttunneln. Vid horisontell deponering kan det finnas möjlighet att välja andra vinklar mellan transporttunnel och deponeringshålmen men det slutliga valet måste baseras på platsspecifika förhållanden. Ett förslag till förvarslayout har tagits fram inom projektet, se figur 4-1. Fördelen med separata nischer framför varje deponeringshål är att det blir plats för borrnings- och deponeringsutrustning utan att transporttunneln blockeras.

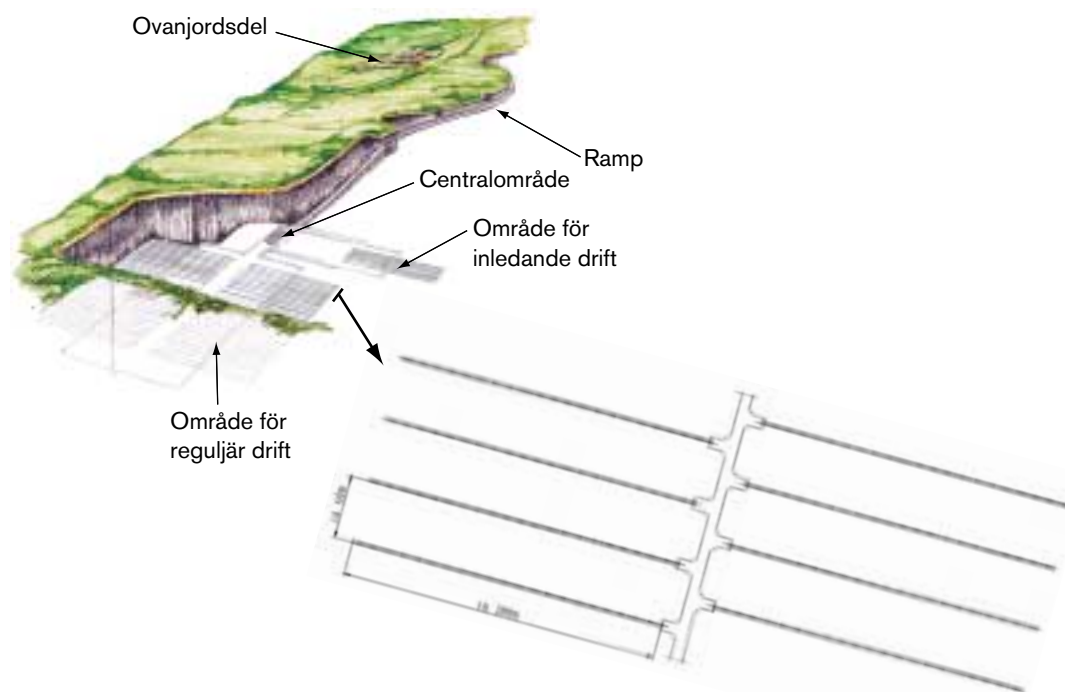
Det är emellertid inte möjligt att idag säga vilken riktning på tunnlarna som är gynnsamast ur bergmekanisk synvinkel.

4.2 Program

Målet med detta delprogram är att ta fram en referensutformning av ett KBS-3-förvar med horisontell deponering. Utformningen ska optimeras med utgångspunkt från de slutsatser som framkommer i de förstudier som ska genomföras för respektive programområde. Särskild hänsyn måste tas till borrningsutrustningens och deponeringsutrustningens utrymmesbehov samt till den beräknade totalkostnaden.

Utformningen av förvarets undermarksanläggning kommer sedan att vara grunden till den preliminära säkerhetsbedömning som måste göras innan beslut fattas om att gå vidare med nästa fas av programmet.

Olika alternativ kommer att studeras inom ramen för detta delprogram främst baserade på platsspecifik information på samma sätt som i arbetet med referensutformningen.



Figur 4-1. Tänkbar förvarslayout för ett KBS-3-förvar med horisontell deponering.

5 Säkerhetsanalys

Den långsiktiga säkerheten för ett djupförvar för använt kärnbränsle står i centrum för SKB:s arbete med forskning, utveckling och demonstration /22/. Det råder ett ständigt samspel mellan säkerhetsanalys, forskning och förvarsutformning. Säkerheten baseras på en given förvarsutformning och på forskningsresultat om de långsiktiga förändringarna i förvarsmiljön. Resultaten av säkerhetsanalysen kan användas till att prioritera nya forskningsinsatser och till att förbättra förvarsutformningen. Nya material eller tillverknings-tekniker kan föranleda ytterligare behov av forskning eller analyser.

SKB har nyligen genomfört en omfattande analys baserad på berggrundsdata från tre olika platser i Sverige /23/. Ingen av platserna är aktuell för ett djupförvar, men tillsammans ger de en god täckning av de olika förhållanden som kan förväntas vid andra platser. Analysen, som baserar sig på referensutformningen KBS-3-förvar med vertikal deponering, benämns SR 97 och har under år 2000 granskats av svenska myndigheter /24/ och av internationella experter /25/.

5.1 Kunskapsläge

Utformningen av ett KBS-3-förvar med horisontell deponering bygger liksom referensutformningen på säkerhetsprinciperna isolering och fördröjning. Isoleringen åstadkoms av en kopparkapsel med gjutjärnsinsats. Om kapseln av någon anledning skulle skadas eller om den har en initial defekt fördröjer buffertmaterialet och geosfären de radionuklider som med tiden kan komma att släppas ut från kapseln. Även den långsamma upplösningen av bränslet bidrar till fördröjning.

Ett KBS-3-förvar med horisontell deponering kan analyseras med avseende på den långsiktiga säkerheten med samma metodik som används för analysen av referensutformningen, eftersom båda varianterna bygger på samma barriärsystem och är tänkta att användas i samma geologiska miljöer.

Analysen SR 97 kan i korthet sägas bestå av att:

- Noga beskriva förvarssystemets initialtillstånd, dvs utseende eller tillstånd då det t ex just byggts och förslutits.
- Kartlägga vilka förändringar förvaret kan tänkas genomgå med tiden till följd av dels inre processer, dels yttre påverkan.
- Utvärdera förändringarnas konsekvenser för säkerheten.

Utmärkande för en säkerhetsanalys är också att underlaget alltid kommer att vara behäftat med brister eller osäkerheter av olika slag. En viktig del av metodiken består därför i att hantera dessa osäkerheter på ett sådant sätt att argumentationen för den redovisade säkerheten blir trovärdig.

Metodikerna talar om hur en säkerhetsanalys genomförs och ger därför också vägledning om vilket underlag som behöver byggas upp i ett långsiktigt program för säkerhetsanalyser. Metodiken i SR 97 kan mer i detalj beskrivas i fem steg:

- Systembeskrivning.
- Beskrivning av initialt tillstånd.
- Val av scenarier.
- Analys av valda scenarier.
- Utvärdering.

Systembeskrivning

En systematisk analys kräver en strukturerad beskrivning av alla inre processer, sambanden dem emellan och de egenskaper hos förvaret som respektive process påverkar. SR 97 beskriver förvarssystemet med så kallade THMC-diagram för förvarsdelarna bränsle, kapsel, buffert och geosfär, se figur 5-1. I diagrammen samlas de processer som långsiktigt förändrar förvaret samt de variabler som beskriver förvaret över tiden. Pilar visar hur olika variabler kvalitativt styr en process som i sin tur påverkar andra variabler.

Beskrivning av initialt tillstånd

Därefter beskrivs förvarets utformning och egenskaper då det just förslutits, dvs dess initiala tillstånd. Här beskrivs dimensioner och material för de konstruerade delarna av förvaret (bränsle, kapsel, buffert och återfyllning) och struktur och egenskaper för geosfären kring förvaret som dessa initialt ser ut.

Val av scenarier

En rad scenarier för vilka förvarets utveckling ska analyseras väljs ut. De valda scenarierna bör tillsammans ge en rimlig täckning av de olika utvecklingsvägar förvaret och dess omgivning kan tänkas ta.

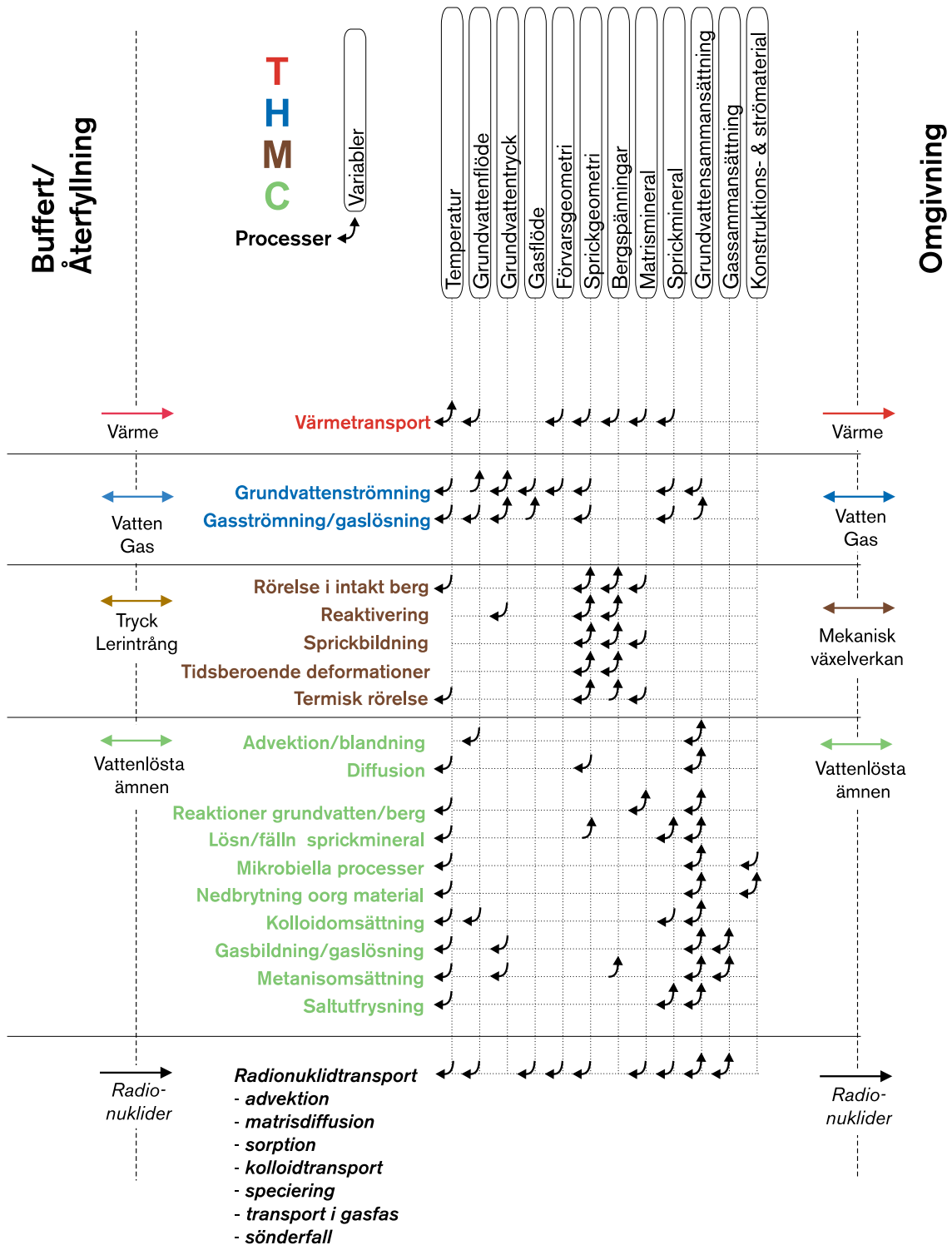
Analys av valda scenarier

Med hjälp av systembeskrivningen analyseras förvarets utveckling för vart och ett av de valda scenarierna. Här används efter behov en rad olika verktyg och metoder, allt ifrån resonemang och enkla överslag till detaljerade modellberäkningar baserade på platsspecifika data.

Utvärdering

Slutligen görs en samlad bedömning av förvarets säkerhet. Här vägs de olika scenarierna ihop till en total riskbild. Slutsatserna i bedömningarna utgör analysens resultat. Här måste också tilltron till resultatet diskuteras i ljuset av de osäkerheter som finns i underlaget till analysen.

Geosfär



Figur 5-1. Exempel på THMC-diagram.

5.2 Program

En säkerhetsanalys genomförs vanligen inför ett specifikt beslutstillfälle i form av ett tidsbegränsat projekt. I SKI:s förslag till föreskrifter, se avsnitt 1.2, sägs att förhållanden, händelser och processer som har betydelse för säkerheten hos ett djupförvar efter förslutning ska analyseras innan slutförvaret uppförs, innan det tas i drift och innan det försluts.

Analysen bygger på ett visst kunskapsunderlag och på en mer eller mindre väl specificerad systemutformning. Dessa underlag växer fram långsiktigt och kontinuerligt.

Vissa ytterligare arbeten som är direkt relaterade till säkerhetsanalysens metodik genomförs också på lång sikt och antas finnas tillgängliga då säkerhetsanalysprojektet startar. Dessa arbeten utgör innehållet i ett långsiktigt program för säkerhetsanalys. Det huvudsakliga innehållet i ett sådant program är att:

- Upprätta en databas över alla egenskaper, händelser och processer av betydelse för bedömningen av förvarets långsiktiga säkerhet. En sådan benämns vanligen FEP-databas efter engelskans features, events, processes. En FEP-databas för ett KBS-3-förvar med horisontell deponering skulle till stora delar vara gemensam med den för referensutformningen.
- Upprätta en systembeskrivning anpassad efter säkerhetsanalysens behov, se punkt 1 i avsnitt 5.1 ovan. I säkerhetsanalysen SR 97 gjordes beskrivningen i form av så kallade THMC-diagram med en vidhängande processrapport /26/ som sammanfattar kunskapen om de processer som styr förvarets utveckling på lång sikt. Detta är ett lämpligt tillvägagångssätt även för ett förvar med horisontell deponering.
- Utveckla modeller för grundvattenflöde i lokal skala samt modeller för radionuklidtransport i närområde och geosfär.

Till programmet för säkerhetsanalys hör också en allmän utveckling av säkerhetsanalysens metodik. Detta tas emellertid inte upp i denna rapport, eftersom befintlig metodik för referensutformningen antas kunna tillämpas för horisontell deponering.

Hur säkerhetsanalysen för ett KBS-3-förvar med horisontell deponering skulle genomföras kan inte planeras i detalj i förväg. Vissa moment kan dock förutses. Redan idag kan vi exempelvis se att följande frågeställningar måste belysas:

- Modellering av en deponeringsbehållares (perforerad eller tät) långsiktiga utveckling.
- Modellering av bentonitens degraderingsförlopp genom kemisk påverkan från deponeringsbehållarens korrosionsprodukter.
- Modellering av bentonitens termo-hydro-mekaniska utveckling under vattenmättnadsfasen och på lång sikt, inklusive växelverkan med omgivande berg.
- Modellering av distansenheternas och eventuella avtätningars betydelse för grundvattenflödet i lokal skala.
- För att analysen av radionuklidtransporten ska bli meningsfull krävs specifikationer av vilka sprickor och vattenflöden som kan accepteras skära deponeringshålen.

6 Buffert

6.1 Kunskapsläge

Det finns ingen principiell skillnad mellan kraven på buffertens isoleringsförmåga mellan horisontell och vertikal deponering. Liksom för KBS-3-förvar med vertikal deponering bör densiteten efter fullständig vattenmättnad ligga i intervallet 1 900–2 100 kg/m³. Det innebär att den hydrauliska konduktiviteten blir så låg att transporten av radionuklider domineras av diffusion.

6.1.1 Kemiska förändringar

De processer som bedöms kunna leda till att buffertens isoleringsegenskaper försämras är:

- Jonbyte.
- Montmorillonitombildning.
- Cementering.
- Uttorkning och ångpåverkan.

Jonbyte

Då bentonitmaterialet i buffert och återfyllning sväller tas vatten upp mellan de enskilda partiklarna i huvudmineralet montmorillonit. Strukturen i bentonitmaterialet förändras därmed drastiskt, vilket bland annat ger de önskvärda fysikaliska egenskaperna. Förmågan att binda vatten mellan de enskilda montmorillonitpartiklarna påverkas av joninnehållet i bentonitens porvatten. De fysikaliska egenskaperna kan därigenom i hög grad påverkas av joninnehållet i porvattnet.

Jonbyte till järn kan ske genom frigörelse av järnjoner från deponeringsbehållaren. De kemiska förhållanden, som kommer att råda i djupförvaret, begränsar emellertid järnets löslighet. Detta blir i stället förmodligen kvar på plats i form av magnetit. Magnetiten har troligen högre genomsläpplighet än buffertleran.

Montmorillonitombildning

Montmorilloniten i bentonitleran kan omvandlas till icke svällande illit om kalium tas upp samtidigt som mineralet värms upp. Reaktionshastigheten bestäms av temperaturen och tillgången på kalium. Kalium finns dels i grundvattnet, dels avges ämnet av cementkomponenten i betong.

Cementering

Uppvärmningen och temperaturgradienten i bufferten gör att smektit och övriga silikater löses när vattnet efterhand tränger in i bufferten. Kisel frigörs och vandrar i riktning mot det kallare berget för att fällas ut som cementerade kiselkomplex.

Processen äger rum inuti deponeringsbehållaren. Den påverkas av att behållaren efterhand korroderar med frigörelse av järn som följd. Detta kan ge upphov till cementering av järn/kiselkomplex.

Uttorkning och ångpåverkan

Bentonitbufferten kommer att torka och spricka invid kapseln. Då vatten efterhand tränger in utsätts den för ånga av hög temperatur. Uttorkningen och ångpåverkan kan reducera svällningsförmågan och självläkningspotentialen /27/. Den långsammare bevätningen av bufferten i ett KBS-3-förvar med horisontell deponering kan påskynda försämringen.

6.1.2 Främmande material

Korrosion av stål innebär att magnetit bildas. Magnetitens densitet är ungefär hälften så stor som stålets. Det innebär att omvandlingsprodukten upptar en ungefär dubbelt så stor volym som det ursprungliga stålets volym. Bufferten pressas samman och får därigenom högre densitet och lägre genomsläpplighet.

Korrosionen ger upphov till vätgas. Denna avgår ut i berget via de vattenförande sprickor. Sprickor finns i tillräcklig mängd för att inte gastrycket ska påverka deponeringspaketet.

6.2 Program

Följande frågeställningar beträffande bentoniten funktion synes för närvarande vara mest angelägna för att förstå bentonitens funktion vid horisontell deponering med perforerade deponeringsbehållare:

- Fastställande av buffertens tjocklek.
- Utsvällning och homogenisering av den högkompakterade bentoniten i hålrummen till spalten mellan berget och deponeringsbehållaren.
- Effekten av inrinnande vatten och med lokal bevätning.
- Effekten av kanalbildning.
- Mineralogiska effekter av deponeringsbehållaren kontakt med bentoniten.

Aktiviteter

Följande insatser behöver göras:

- Utredda hur distansenheterna mellan deponeringsbehållarna bäst utformas och fungerar.
- Utredda hur utsvällningen av bentonit i spalten mellan en perforerad deponeringsbehållare och berget sker.
- Utredda hur korrosion av och hål i deponeringsbehållaren påverkar bevätningen av bufferten och dess densitet.
- Utveckla geokemiska modeller för att förutsäga cementering och omvandling av bufferten.

- Utredda, om och i så fall hur, torkning och sprickbildning påverkar buffertens isoleringsförmåga.

Som ett första steg föreslås följande:

- Laboratorieförsök i skala 1:10 av en del av en deponeringstunnel med deponeringspaket med perforerad deponeringsbehållare. Ett sådant försök syftar till att studera utsvällning och homogeniseringen av bufferten och distansenhetens funktion. För att distansenheten ska kunna simuleras bör försöket omfatta två kapslar. Eventuellt kan hålstorleken och perforeringsgraden varieras. Bevätningen görs med hjälp av filter i omgivande förslutande stålrör. Tryck och relativ fuktighet i bentoniten mäts.
- Homogeniseringen modelleras parallellt med laboratorieförsöket med hjälp av det finita elementprogrammet ABAQUS.
- Bentonitens samverkan med rinnande vatten simuleras i laboratorieförsök. Ett sådant försök skulle kunna göras i en mindre ståltub (5 cm diameter) med instoppade bentonitkutsar. Genom att variera flöde och vattentryck kan effekter av lokal bevätning och piping studeras.
- Frågan om vilka mineralogiska effekter som fås i kontaktytan mellan bentonit och stål studeras för närvarande i samband med utformningen av KBS-3-förvaret med vertikal deponering.

7 Geovetenskap

7.1 Kunskapsläge

7.1.1 Slutsatser från JADE-projektet

Enligt vad som tidigare nämnts behandlade JADE-projektet de olika deponeringsvarianterna ur aspekterna långstidsfunktion och säkerhet, teknik och kostnader. Som underlag för jämförelsen av långsiktig funktion och säkerhet samt teknik jämfördes de olika varianterna med avseende på geovetenskapliga förhållanden. Målet var att identifiera, och om möjligt kvantifiera, hur en bergmassa och dess diskontinuiteter påverkar de olika deponeringsvarianterna.

Analysen delades upp i tre ämnesområden:

- Hydrogeologi.
- Bergmekanik.
- Strukturgeologi.

Studierna baserades på de rådande geologiska förhållandena i den nedre borrhålen i den nedre delen av tunneln i Äspölaboratoriet. Därmed blev resultatet av analysen i viss mån platsspecifikt, men generella slutsatser kunde också dras. Vissa skillnader i bergmekanisk påverkan fås också beroende på om jämförelsen baseras på konventionell teknik med borrhning och sprängning eller på fullortsborrning av transport- och deponeringstunnlar.

De slutsatser från JADE-projektets geovetenskapliga del /28/ som redovisas nedan baserar sig på att transport- och deponeringstunnlar byggs genom konventionell teknik med borrhning och sprängning:

- Om en hydraulisk anisotropi, dvs den hydrauliska konduktiviteten varierar i olika riktningar, är utvecklad i en given bergmassa kan riktningen på tunnelsystemen (i förhållande till den lokala anisotropin) påverka bortfallet av deponeringspositioner.
- Det finns skillnader i bergmekanisk stabilitet mellan de olika metoderna, men det finns möjlighet att orientera tunnelsystemet i den för deponeringshålen fördelaktigaste riktningen. Bedömningen är dock att de problem som uppstår på grund av instabilitet i tunnlar kan lösas genom förstärkningar och utgör inget egentligt problem.
- KBS-3 med vertikal deponering och KBS-3 med horisontell deponering av en kapsel i varje deponeringshål bedöms vara robustare än KBS-3 med horisontell deponering av flera kapslar i varje hål. De är lämpliga om bergspänningarnas storlek och riktning varierar mycket.
- Bergets sprickmatrix påverkar bortfallet av kapselpositioner vid de olika deponeringsvarianterna olika. Skillnader finns mellan de olika varianterna, men dessa är små om man baserar bedömningen på det data som finns från Äspö. Denna slutsats är generell under förutsättning att mängden diskriminerande strukturer inte är betydligt större än den som dokumenterats på Äspö.

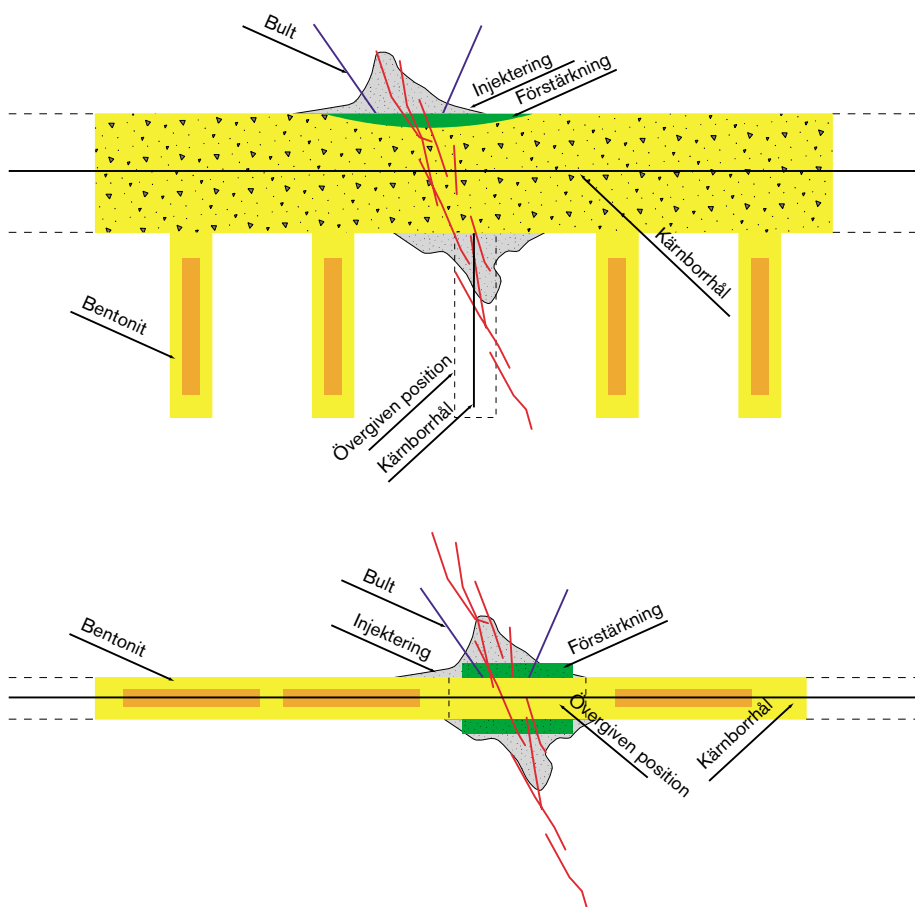
- För den studerade bergmassan på Äspö bedöms KBS-3 med vertikal deponering och KBS-3 med horisontell deponering av en kapsel i varje hål vara lämpligare varianter än KBS-3 med horisontell deponering av flera kapslar i varje deponeringshål.

Referensutformningen KBS-3 med vertikal deponering bedömdes i JADE-projektet vara den fördelaktigaste utformningen om man tar hänsyn till såväl långsiktig funktion och säkerhet, teknik samt ekonomi. Små skillnader i kostnader och inga fördelar när det gäller deponeringsteknik gör att det inte är motiverat att satsa vidare på horisontell deponering av en kapsel i varje deponeringshål.

Ett KBS-3-förvar med horisontell deponering av flera kapslar i varje deponeringshål kan dock bli avsevärt billigare än ett KBS-3-förvar med vertikal deponering. Det bedömdes dock vara känsligare för mängden vatten som kan tillåtas läcka in i förvaret än vad ett KBS-3-förvar med vertikal deponering är. Horisontell deponering rekommenderas därför bara för bergmassor med liten förekomst av strukturer som inte skär deponeringshålen.

7.1.2 Geologiska förutsättningar för horisontell deponering

De geologiska förutsättningarna för att deponera kapslar med använt kärnbränsle är i större skala (regionala sprickzoner och större lokala sprickzoner) desamma oavsett om kapslarna deponeras vertikalt eller horisontellt /28/. I figur 7-1 visas skärande sprickor i deponeringstunnlar och deponeringshål. I en skala som motsvarar deponeringstunnlar (vertikal deponering) och deponeringshål (horisontell deponering) kan skillnader finnas. Dessa beror dels på de tekniska förutsättningarna för de olika varianterna, dels på lokala



Figur 7-1. Skärande sprickor i deponeringstunnlar och deponeringshål.

geologiska förhållanden som strukturernas riktning, bergets hydrauliska konduktivitet, förekomsten av diskriminerande bergarter, ogynnsamma bergspänningar etc.

Kravet på långsiktig funktion och säkerhet ska vara uppfyllt för varje position oavsett deponeringsvariant. Detta innebär att skillnaderna mellan förvarsutformningarna kommer att vara begränsad till behovet av utrymme samt till kostnaden för att byggnation, drift och förslutning av deponeringshålen och deponeringstunnlarna.

När de geologiska förutsättningarna för ett KBS-3-förvar med horisontell deponering analyseras och när varianten jämförs med referensalternativet är det viktigt att skilja på frågeställningar som rör den långsiktiga funktionen och problem som kan åtgärdas genom olika typer av tekniska åtgärder.

7.1.3 Hydrogeologi

Bergmassans hydrauliska anisotropi påverkar vattenflödet till deponeringshålen olika mycket beroende på hur dessa utformas och orienteras i bergmassan.

SKB har tidigare utfört en studie av den hydrauliska anisotropin i bergmassan på Äspö /28/. Resultaten baserar sig på mätningar i subvertikala borrhål (spårämnesförsök) från markytan och subhorisontella sonderingshål (tryckkuppbyggnadstester) från tunneldrivningen. Transmissiviteten uppmättes i genomsnitt till $4 \cdot 10^{-7}$ m²/s inom riktningsintervallet 120–140 grader och $2 \cdot 10^{-9}$ m²/s inom riktningsintervallet 20–80 grader. I kärnborrhålen beräknades transmissiviteten i genomsnitt till $2 \cdot 10^{-8}$ m²/s. Kärnborrhålen antas representera flödet i horisontalplanet. I analysen ingick även att beräkna medelavståndet mellan hydrauliska strukturer med en transmissivitet större än givna värden.

Resultatet av dessa beräkningar användes som indata för beräkning av positionsbortfallet med ett geostatistiskt analysverktyg kallat BayMar (Bayesian Markov Geostatistic Model) /29,30/. Beräkningarna resulterade i en beskrivning av antalet möjliga deponeringspositioner i olika riktningar i form av ett så kallat hydrauliskt positionsindex. Detta uttrycker sannolikheten för att en deponeringsposition kan accepteras, under förutsättning att den hydrauliska konduktiviteten håller sig inom i förväg valda gränser. Resultatet visar att bortfallet av positioner beror av riktningen.

7.1.4 Bergmekanik

Spänningstillståndet i en bergmassa påverkar stabiliteten i tunnlar och deponeringshål beroende på metod för berguttag och deponeringstunnlarnas eller deponeringshålens riktning.

För att kunna jämföra olika deponeringsvarianter och för att kunna avgöra hur transporttunnlar och deponeringshål ska orienteras är det nödvändigt att kunna kvantifiera anisotropin i spänningsfältet samt att kunna bedöma känsligheten för variationer i spänningsmagnitud och riktning i relation till riktningen på deponeringstunnlar eller deponeringshål. Spänningstillståndet påverkar även sprickornas konduktivitet i närområdet, deras benägenhet till propagering etc.

I JADE-projektet omfattade de bergmekaniska analyserna /28/ dels frågeställningar som rör deponeringshålens stabilitet i relation till de rådande bergspänningarna och diskontinuiteterna i bergmassan närmast deponeringshålet, dels studier av bergspänningarnas inverkan på vattenomsättningen i närfältberget. Såväl fall där transporttunnlarna har byggts genom borrhning och sprängning som genom fullortsborrning har analyserats. De bergmekaniska analyserna har genomförts med olika numeriska koder, som delvis fokuserar på olika frågeställningar.

Resultatet av beräkningarna visar att skillnaderna i funktionssätt blir relativt små om de horisontella deponeringshålerna kan orienteras i en från bergmekanisk synpunkt gynnsam riktning. Valet av metoden för bergsdrivning för transporttunnlarna påverkar deponeringshållets stabilitet och sprickornas potentiella propageringsförmåga.

7.1.5 Strukturgeologi

En bergmassa består av mer eller mindre oregelbundna block av varierande storlek och egenskaper. Blocken är avgränsade av deformationer av olika storlek och med olika egenskaper. Studier av bergmassans strukturella egenskaper omfattar blocken, dess inre strukturer och de avgränsande diskontinuiteterna. Under vissa omständigheter är bergmassans egenskaper skalberoende. Det är viktigt att beakta vilken skala de olika studierna bedrivs i. En bergmassas plastiska anisotropi, dvs dess planparallella foliation, skjuvzoner och bergartskontakter, kan vara mer eller mindre starkt utvecklad. Denna plastiska anisotropi påverkar bergmassans mekaniska egenskaper olika beroende på vilken skala som används.

Beräkningar med FracMan /28/ påvisar ingen signifikant skillnad i antalet sprickor som skär deponeringshålerna vid horisontell eller vertikal deponering. Analyserna med PA Works /28/ och MAFIC /28/ visade däremot att spricknätverken är mer konnekterade, dvs antalet potentiella flödeskanaler är större, i vertikal än i horisontell riktning.

På Äspö finns gångar med finkornig granit. Dessa är diskriminerande strukturer, eftersom såväl sprickintensiteten som vattenföringen är hög. Deponeringshålerna för KBS-3 med horisontell deponering bör på Äspö riktas mot nordväst för att minimera skärningsytan mellan deponeringshålerna och de finkorniga graniterna. Nackdelen med en sådan riktning är att deponeringshålerna löper parallellt med de vattenförande strukturerna och den hydrauliska anisotropin, vilket försvårar tätning.

Den viktigaste slutsatsen av den strukturgeologiska analysen är att förekomsten av diskriminerande strukturer är tillräckligt liten för att skillnaderna mellan vertikal och horisontell deponering vid KBS-3-metoden ska bli marginell.

Med hänsyn till den tekniska utformningen av ett KBS-3-förvar med horisontell deponering kan denna variant i dagsläget endast rekommenderas för bergmassor med liten förekomst av större och mindre lokala sprickzoner. Orsaken till detta är att vatteninflödet i deponeringshålerna måste begränsas för att inte bentonitbarriären runt kapslarna ska erodera. Vidare kan KBS-3 med horisontell deponering endast rekommenderas om förekomsten av diskriminerande bergarter är liten. Därmed rekommenderas inte ett KBS-3-förvar med horisontell deponering i ett berg som liknar det på Äspö. Bortfallet av deponeringspositioner bedöms bli stort.

7.1.6 Beräkning av accepterade deponeringspositioner

Antalet godkända deponeringspositioner, i förhållande till de förkastade, påverkar deponeringshålens totala längd och därmed också mängden uttaget berg och i slutändan också kostnaderna. Bortfallet av deponeringspositioner påverkar också förvarets areella utbredning och den bergvolym som behövs.

Tidigare beräkningar av bortfallet av kapselpositioner /29,30/ visar på stora variationer beroende på beräkningsmetod och acceptanskriterier. Beräkningar av bortfallet med verktyget BayMar pekar på att detta kan bli mycket stort i absoluta tal för en bergmassa som liknar den på Äspö. Detta gäller både för horisontell och vertikal deponering och oavsett deponeringsriktningen. Stor osäkerhet råder bland olika experter beträffande hur

signifikanta dessa resultat är. Osäkerheten gäller såväl modellen som de uppställda kravnivåerna för hydraulisk konduktivitet.

I JADE-projektet diskuteras också alternativ till BayMar för att beräkna bortfallet av kapselpositioner. En möjligt metodik kan vara att tillämpa stokastiska 3D-simuleringar av diskreta spricknätverk där även tunnelgeometrierna kan simuleras med stor precision. Preliminära simuleringar /31/ indikerar att andelen accepterade kapselpositioner i Äspö-typiskt berg ligger i intervallet 91–95 procent för vertikal deponering och 86–94 procent för horisontell deponering, beroende på deponeringsriktning.

7.2 Program

Eftersom de olika varianterna av KBS-3-metoden är lika, kommer behovet av forskning och utveckling när det gäller geovetenskap att vara av generell karaktär och detsamma för de olika metoderna. Dessa insatser beskrivs bland annat i SKB:s senaste program för forskning, utveckling och demonstration /22/. Vissa metodspecifika geovetenskapliga frågeställningar måste dock belysas för att de ska kunna utgöra ett underlag till en jämförelse mellan vertikal och horisontell deponering och för ett eventuellt beslut om ytterligare utveckling av horisontell deponering.

Den geologiska delen av FUD-programmet för horisontell deponering kopplas till SKB:s planering för byggandet av djupförvaret. De undersökningarna som planeras äga rum inom ramen för detta program kan delas in i följande skeden:

- Utredningar om de geologiska förutsättningarna för ett KBS-3-förvar med horisontell deponering baserat på data från Äspö. För att bedömningarna ska bli så generella som möjligt utförs känslighetsstudier avseende olika förutsättningar som förvarsdjup, uppsprickning av bergmassan, rådande bergspänningar och hydraulisk konduktivitet.
- Utredningar baserade på geologisk information från platsundersökningarna.

Om metoden fortfarande är aktuell tillkommer i ett senare skede utredningar baserade på geologisk information från byggandet av nedfarten till djupförvaret och undersökningar utförda på deponeringsnivån.

Utredningarnas syfte är att studera hur en bergmassa och dess diskontinuiteter påverkar ett KBS-3-förvar med horisontell deponering jämfört med ett KBS-3-förvar med vertikal deponering och måste baseras på platsspecifika data. Sammanfattningsvis innebär detta att:

- Analysera vattenflödet i deponeringshålen med hänsyn till variationerna i en bergmassas hydrauliska egenskaper.
- Analysera hur variationerna i en bergmassas mekaniska egenskaper påverkar deponeringshålen.
- Fastställa acceptanskriterier för deponering i ett KBS-3-förvar med horisontell deponering.
- Fastställa respektavstånd mellan kapslar och lokala mindre sprickzoner i ett horisontellt deponeringshål.

- Beräkna bortfallet av deponeringspositioner för vertikal deponering respektive horisontell deponering.
- Identifiera kunskapsluckor.

Nedan beskrivs detta arbete med högre detaljeringsgrad för de ingående ämnesområdena.

7.2.1 Hydrogeologi

När den hydrogeologiska modell /28/ som låg till grund för JADE-studien upprättades var förutsättningen att de hydrauliska anisotropierna skär borrhålet vinkelrätt. Grunden för detta antagande och eventuella effekter på resultatet behöver utredas vidare. Det är nödvändigt att förfinas modellen för att kunna bedöma hur stort bortfallet av deponeringspositioner blir. Hänsyn måste tas till bergmassans genomsnittliga konduktivitet samt transmissiviteten för lokala mindre sprickzoner och enskilda sprickor, vilket kräver tillgång till plats specifika data.

Följande insatser behövs för att få ett underlag för att kunna bedöma acceptanskriterierna för deponering av kapslar och för att kunna beräkna bortfallet av deponeringspositioner för de båda förvarsvarianterna:

- SKB behöver ta fram en modell över inflödet av grundvatten till deponeringshålen för att få ett underlag för att kunna bedöma vilka acceptanskriterier vi ska ha samt för att kunna beräkna bortfallet av deponeringspositioner. Det ackumulerade inflödet av vatten längs med deponeringshålen och inflödets storlek i diskreta sprickor har betydelse för detta. Grundvattensimuleringar behöver utföras med både en kontinuummodell och med en diskret sprickmodell. På grund av den hydrauliska anisotropin i bergmassan bör simuleringar med avseende på deponeringshål i olika riktningar göras.
- SKB måste fastställa gränsvärden för hur stort inläckage som kan tolereras i ett deponeringshål. Viktiga tekniska frågeställningar är här vilken möjlighet vi har att bygga tekniska barriärer i deponeringshålen och hur stor bentonitens integritet mot inläckande vatten är under deponeringsprocessen.

7.2.2 Bergmekanik

De bergmekaniska analyserna koncentreras till effekter som påverkar den långsiktiga funktionen och säkerheten, dvs initiering, reaktivering och propagering av diskontinuiteter som kan påverka vattenomsättningen i närfältsberget. Analyserna baseras på den bergmekaniska modell som upprättats för Äspö. Det är nödvändigt att fastställa om variationer i djup leder till några generiska skillnader.

Det planerade utvecklingsarbetet av horisontell deponering och jämförelsen med vertikal deponering baseras på att transporttunnlar och deponeringstunnlar byggs genom konventionell borrhning och sprängning.

- Den bergmekaniska påverkan och behovet av förstärkningsåtgärder beror på deponeringstunnlarnas (vertikal deponering) respektive deponeringshålens (horisontell deponering) riktning. För att kunna jämföra deponeringsvarianterna bör SKB utreda vilken betydelse orienteringen i förhållande till den största horisontella huvudspänningen och lokala mindre sprickzoner har.
- Redan utförda bergmekaniska analyser bör kompletteras med beräkningar där hänsyn tas till olika deponeringsdjup (400 meter, 500 meter respektive 700 meter).

7.2.3 Strukturgeologi

Utredningsarbetet som presenteras i denna programdel baserar sig på data från Äspö när det gäller erforderlig detaljeringsgrad och behov av information om lokala mindre sprickzoner och sprickor. För att kunna få ett mera allmängiltigt resultat är det nödvändigt att utföra känslighetsanalyser med avseende på bergmassans strukturgeologiska egenskaper. Känslighetsanalysen baseras på generiska kunskaper om svensk berggrund. För att undvika effekten av diskriminerande bergarter kan en möjlighet vara att ta fram en modell som baserar sig på data från Äspö, men där gångarna av finkornig granit uteslutits.

7.2.4 Beräkning av accepterade kapselpositioner

Idag finns vissa kriterier för när ett deponeringshål ska godkännas eller inte vid deponering enligt referensmetoden. Vidare arbete med detta pågår. En viktig del i detta är de fullskaleförsök som görs i Äspölaboratoriet. På samma sätt är det nödvändigt att fastställa metodspecifika kriterier för deponeringshål i ett KBS-3-förvar med horisontell deponering.

Utredningarna avseende konnektioner med diskriminerande sprickor bör uppdateras med hänsyn till den reviderade geologiska modellen. För att bedöma hur stort bortfallet av kapselpositioner blir är det nödvändigt att ta hänsyn till respektavståndet till strukturer av olika ordningar. En bedömning bör baseras på strukturernas egenskaper och utbredning samt på vilka möjligheter man har att täta och förstärka berget under byggnadskedet.

För att kunna beräkna positionsbortfallet i absoluta tal är det nödvändigt att utveckla lämplig metodik. Som underlag för dessa beräkningar måste tekniska och geovetenskapliga acceptanskriterier för horisontell deponering fastställas. Olika geovetenskapliga kravgränser ska fastställas för horisontell deponering. Gränserna ska baseras på de tidigare beskrivna geovetenskapliga studierna i denna programdel, samt på de övriga tekniska undersökningar som görs. Skillnaderna mellan vertikal deponering och horisontell deponering analyseras därefter.

Ett lämpligt sätt att beräkna bortfallet av kapselpositioner är att koda data från Äspö med avseende på respektavstånd. Det innebär att kapselbortfallet ganska enkelt kan beräknas med utgångspunkt från det befintliga karteringsunderlaget och bedömningsgrunderna. Beräkningarna bör utföras med redundanta modeller.

Följande utvecklingsarbete krävs:

- Det är nödvändigt att fastställa respektavstånden till de lokala mindre sprickzonerna för att kunna jämföra deponeringsvarianterna. Det är också nödvändigt att kvantifiera denna parameter, så att framtida scenarier i ett modellerat förvar kan simuleras. Vare sig kvantifieringen av gränsvärdena visar sig vara korrekt eller ej, finns det behov av ett underlag för att beräkna bortfallet av kapselpositioner under olika skeden av platsvalsprocessen.
- Undersökningar bör också göras om det går att täta lokala större sprickzoner, se kapitel 9, och i så fall vilket respektavstånd som ska hållas till sådana zoner.
- Bortfallet av kapselpositioner för både vertikal deponering och horisontell deponering bör beräknas med de framtagna beräkningsmodellerna, t ex FracMan. Beräkningarna baserar sig på den framtagna geologiska modellen, de fastställda acceptanskriterierna samt på av SKB tillämpad beräkningsmetodik.

8 Borrning

Fullortsborrning av stora tunnlar i kristallint berg kan i dag anses vara en beprövad teknik. Fullortsborrning av tunnlar med liten diameter har också utvecklats och så kallade Micro Tunnel Boring Machines (MTBM) eller TBM för tunneldimensioner som är aktuella för horisontell deponering finns tillgängliga på marknaden. Alternativ till TBM finns också i form av borrning med vattenhammare i cluster. Tunneldiametern ökas då i ett antal steg för att bland annat minska vattenbehovet till borrustrustningen. Följande förutsättningar gäller för val av maskin och metod vid borrning av deponeringshål vid horisontell deponering.

- Deponeringshålens diameter är preliminärt cirka 1,75 meter. Exakt diameter kan bestämmas när kraven på bufferten och deponeringshålen är kända samt när utrustningen för hantering och deponering av buffert och kapsel är utredda.
- Deponeringshålens längd kan variera mellan 100 och 500 meter. Den nedre gränsen anger vad som bedöms vara praktiskt och ekonomiskt möjligt att utnyttja för deponering. Typiska längder har bedömts ligga omkring 250 meter.
- Deponeringshålen ska vara raka och parallella inom varje deponeringsvolym. Det inbördes avståndet mellan deponeringshålen och kapslarna bestäms av kapslarnas resteffekt samt värmeledningsförmåga i buffert och berg för att inte överskrida dimensionerande temperatur på kapselns ytan. Preliminär avståndet mellan deponeringshålen antagits till 40 meter och avståndet mellan kapslarna till 1,2 meter.
- Deponeringshålen antages luta svagt uppåt, så att det vatten som läcker in i deponeringshålet kan rinna ut i transporttunneln under deponeringsskedet. Lutningen har antagits till maximalt 2 grader.
- Riktningen på deponeringshålen kommer troligen att bestämmas av riktningen av den dominerande horisontella huvudspänningsriktningen och riktningen av de dominerande vattenförande spricksystemen. En viss avvikelse från det ortogonala systemet kan förekomma om detta leder till att man kan utnyttja utrymmet bättre i de bergblock som finns tillgängligt för deponering.
- Deponeringshålen ska vara tillräckligt raka och tunnelväggarna tillräckligt jämna för att deponeringen ska kunna genomföras utan problem. Bentonitblocken och kapseln får inte heller skadas under deponeringsprocessen.
- Större vattenförande partier förutses injekteras i samband med borrningen av deponeringshålen.

8.1 Kunskapsläge

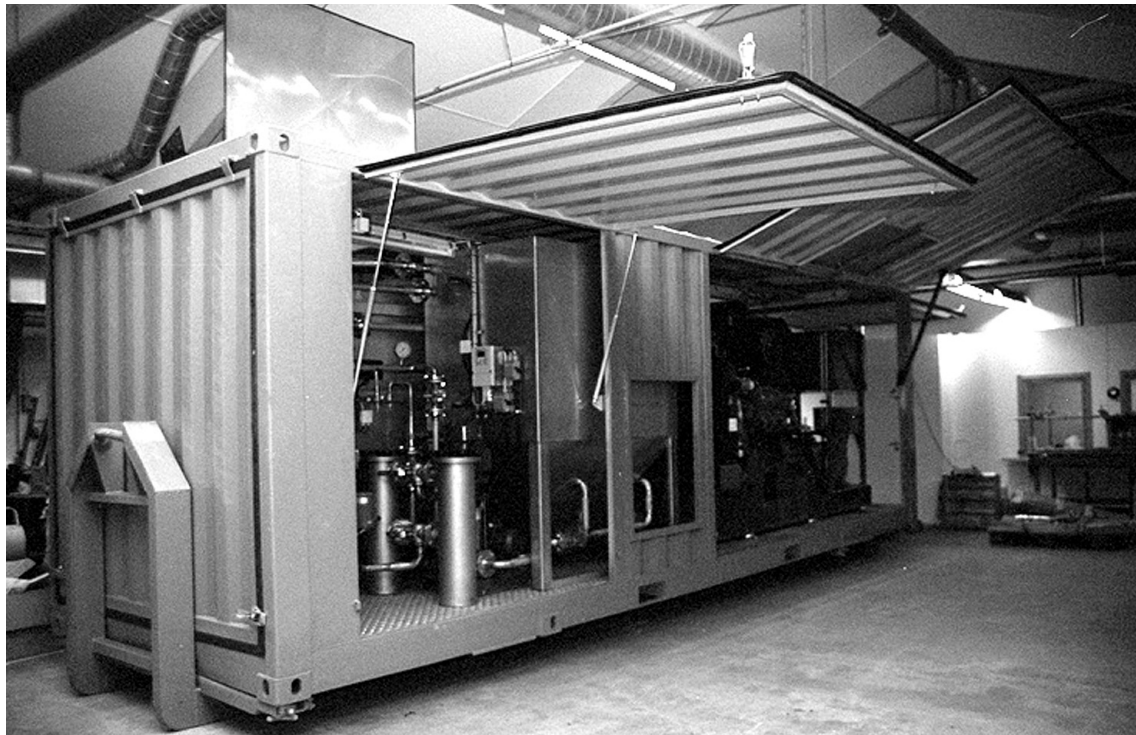
8.1.1 Borrningsteknik

Förutom tekniken med hammarbörning i steg, så kallad clusterbörningsteknik, finns det två typer av maskiner för att borra i hårt berg: TBM (Tunnel Borrning Maskin) och RBM (Raise Boring Machine). RBM används normalt för stigortsbörning men kan även användas för börning av horisontella tunnlar.

Clusterbörningsteknik

Utrustningen består av följande huvudkomponenter:

- **Pumpvagnen** som förser vattenhamrarna med tillräckligt vattenflöde och med tillräckligt högt tryck. Normalt kräver varje vattenhammare upp till 500 liter per minut med ett tryck på upp till 180 bar. Trycket skapas med hjälp av kolvpumpar. När börningen sker med flera vattenhammare monterade i ett cluster blir vattenflödet stort. Vattnet samlas upp i mobila sedimentationsbassänger och filtreras för att kunna återanvändas. Pumparna med filter är normalt monterade i containrar för att medge en enkel och snabb uppställning, se figur 8-1.
- **Bäraren (borrigen) med borrstänger** krävs för att inducera tryck och rotation av clustret. Riggen kan vara självgående eller flyttas med något fordon. Rörhanteringen sker med hjälp av rörarm och kran. Längden av borrören kan varieras beroende på vilket utrymme som står till förfogande. Matningstrycket för den applikation som är aktuell för KBS-3 med horisontell deponering är i storleksordningen 10 ton. Vridmomentet uppgår till cirka 5 kPm.



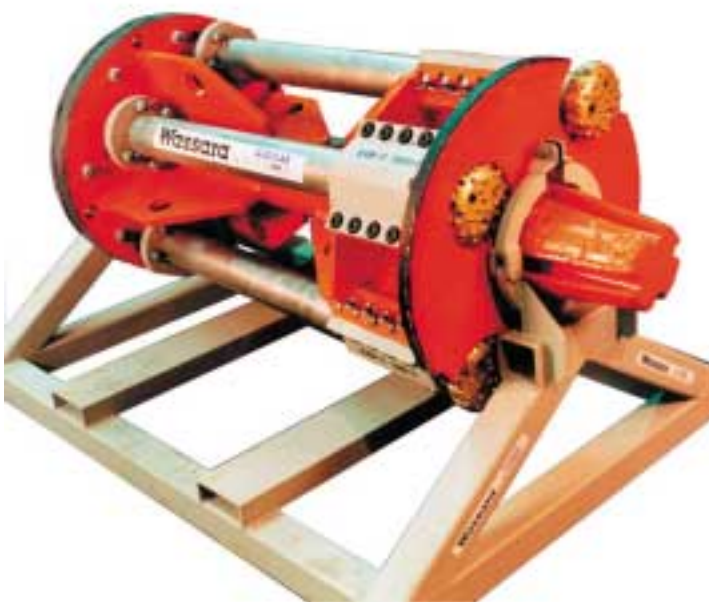
Figur 8-1. Container för högtryckspumpar och filter.

- **Clustret med vattenhammare** består av en ramkonstruktion av stål i vilket ett antal clusterhammare placerats. Varje vattenhammare arbetar för sig, men med vattenförsörjning från samma högtryckspump. Vattentillförseln sker via den ihåliga borrarsträngen. Antalet hammare som monteras i clustret beror på vilken dimension som ska borraras. För att erhålla ett rakt hål är det viktigt att det finns ett kärnborrat pilothål som styr clustret. Rakheten på pilothålet är helt avgörande för det slutliga hålets rakhet och kvalitet. En viktig del av clustret är därför den så kallade styrpinnen som monteras längs fram. Styrpinnen måste vara tillräckligt lång och stabil för att styra clustret i pilothålets riktning. Styrpinnen kan utformas på olika sätt. Vanligast är att styrpinnen är 1,5–2 meter lång. Hamrarna som monteras i clustret har diametern 150 mm och vattentrycket upp till omkring 180 bar. Vattenförbrukningen varierar mellan 350 och 500 liter per minut beroende på med vilken hastighet framdrivningen ska ske. Hamrarna har monterade stiftborrkronor och är anpassade för borrar med cluster.

Figur 8-2 visar en vattenhammare och ett cluster med vattenhammare utformat för att kunna borra ett hål med diametern 980 mm.

- **Sedimentationsutrustningen** utgörs normalt av sedimentering i containrar eller anlagda utrymmen. Storleken på sedimentationsanläggningen anpassas till mängden cirkulerande vatten så att tillräcklig tid finns att de fina partiklar som uppstår vid borrarningen ska sedimentera.

Under borrarning med cluster kommer stora krafter att verka på clusterramen, speciellt vid den stora diameter och de hållängder som är aktuella vid horisontell deponering. Utformningen av utrustningen måste också anpassas till de förutsättningar som gäller i djupförvarets transporttunnlar. Utrustningen bör vara kompakt och alla delar bör vara mobila.



Figur 8-2. Vattenhammare och arrangemang av ett cluster för att borra ett hål med diametern 980 mm.

Uttransport av borrhslam

Vattnet som krävs för att driva hamrarna utnyttjas också för transport av det krossade berget i fronten till deponeringshålets mynning. Vatten och bergmaterial samlas där upp och leds till sedimentationsanläggningen. Det är därför önskvärt att deponeringshålet lutar något mot transporttunnelns mynning. Om deponeringshålet är mycket långt kommer det eventuellt också att krävas ytterligare arrangemang för att transportera bort borrhslammet. Figur 8-3 visar clustret under borrning i borrhål och hur borrhslammet rinner ut ur borrhålet.

Injektering

Om resultatet av den geologiska karakterisering av berget, som gjorts med utgångspunkt från kärnborrhålet i deponeringshålets centrum, visar att hålet korsar sprickzoner med hög vattenföring måste zonerna tätas.

Clustret kan inte förses med någon utrustning för injektering under borrningen. Om man från den bergkarakterisering som erhållits från kärnborrhålet i deponeringshålets centrum har bedömt att injektering är nödvändig måste detta utföras med separat utrustning. Det är fullt realistiskt att stoppa borrningen framför den zon som kräver injektering, plocka ut clusterhuvudet med borrhstänger och sedan utföra erforderlig injektering med separat borrh- och injekteringsutrustning. Eventuellt måste pilothålet rensas innan borrningen med cluster kan påbörjas på nytt.

Omtag till nästa tunnelpåslag

Clustertekniken kräver inga speciella arrangemang för att påbörja borrningen av ett nytt deponeringshål. Borrriegen kan snabbt ställas upp på platsen för nästa deponeringshål. Uppställningen av de mobila sedimenteringsbassängerna måste ske på ett rationellt sätt för att undvika att dessa måste flyttas i onödan.



Figur 8-3. Borrning med cluster.

Riktningshjälp

Borrningen inleds med att ett kärnborrhål med 76 mm borras i centrum av deponeringshålet. På så sätt kan bergblocket längs deponeringshålet karakteriseras. Nästa steg är att öka kärnborrhålet diameter till cirka 250 mm med hammarbörning med kärnborrhålet som styrhål. Det nya hålet utgör sedan pilothål för det första clustret som ökar hålets diameter till cirka 1 meter. Nästa steg är att öka diametern på deponeringshålet till den slutliga diametern. Raketeten på deponeringshålet är helt beroende på hur rakt det första kärnborrhålet är.

Tillverkare

Tekniken att använda vattenhammare i cluster för att borra tunnlar i berg har utvecklats av det svenska företaget Wassara AB. Ett antal referenser finns för tunnlar byggda med denna teknik i hårt berg men dock inte med den nu aktuella diametern.

TBM

En TBM består i huvudsak av tre komponenter:

- **Borrhuvudet** är försett med kuttrar som krossar berget. Det är sammankopplat med en drivenhet via en axel.
- **Drivenheten** består av motorer som driver borrhuvudet samt en hydraulisk cylinder som trycker borrhuvudet mot berget. Spännben (gripplar) tar spjörn mot bergväggarna och skapar därmed en mothållande kraft. Borrhuvudet kan därmed rotera och drivas framåt. Maskinen kan också ta spjörn mot en infodring som placeras bakom maskinen.
- **Bakriggen** är kopplad till maskinen. Denna består vanligen av enheter för utlastning, driftövervakning, underhåll, transmission etc.

Tunnlar med liten diameter har hittills för det mesta borrats vid sämre geologiska förhållanden. En vanlig lösning är då att frammatningen av maskinen sker genom att en domkraft tar spjörn mot en bakomliggande infodring av stålrör eller betongsegment.

Uttransport av borrhax

Vid borrning i jord och mjuka bergarter är den vanligaste tekniken för att transportera ut borrhax från tunnelfronten att överföra det till en slurry. Detta leder med nödvändighet till att det behövs extra utrustning som en separationsanläggning, pumpar, ledningar m m. Att transportera ut borrhax från hårt berg i form av slurry är i allmänhet inte lönsamt. Pumparna har då en högre energiförbrukning och det är tekniskt svårt att förlänga pumpledningarna. Ledningar och pumpar slits också hårdare. Uttransport med slurry är också rent generellt mera känslig för störningar än torra transporter.

Uttransporten av borrhax vid borrning i hårt berg löses vanligen genom att borrhaxet förs ut på transportband. Denna princip har tidigare tillämpats av bl a Borettec vid borrning i hårt berg. Erfarenheterna från detta är goda. Uttransporten av borrhax med vacuumutrustning bör också kunna ske på långa sträckor.

Injektering

Borr- och injekteringsutrustning kan placeras bakom gripparna. Det är också möjligt att utforma hål för borrstänger runt hela maskinens omkrets /32/. Då behövs emellertid en extra borrsträcka på 10–15 meter, eftersom utrustningen är placerad ganska långt bakom fronten.

Omtag till nästa tunnelpåslag

Det kan bli nödvändigt att spränga ut de sex till åtta första metrarna av varje deponeringshål för att kunna få kraft med gripparna i början på varje tunnelpåslag. En annan möjlighet är att borrhningen sker från ett startrör.

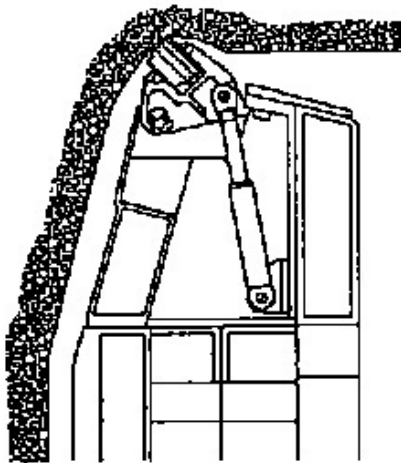
Eftersom maskinens diameter är liten måste mängden utrustning inne i deponeringshålet minimeras. Transformatorer och annan utrustning placeras därför utanför deponeringshålet i transporttunneln. Strömförsörjningen sker med hjälp av en kabel från transporttunneln till TBM-maskinen.

Riktningshjälp

Vid borrhningen styrs riktningen på borrhålet med hjälp av gripparna. I standardutförandet har en TBM-maskin två grippar, en på varje sida. Sidoförskjutningen blir då mellan tre och fem centimeter vid varje omtag. Flera grippar ger en styvare konstruktion och därmed också en mindre sidoförskjutning. En förskjutning på mellan en och två centimeter vid varje omtag borde vara fullt möjlig att uppnå.

Profilutvidgning

I sämre bergpartier kan förstärkning av berget bli nödvändig. För att inte inkräkta på den teoretiska tunnelprofilen måste tunneldiametern kunna utvidgas om det visar sig att förstärkningar i form av sprutbetong eller foderrör behövs. En möjlighet att utvidga profilen är att vinkla de kuttrar som sitter i periferin av borrhuvudet samtidigt som maskinen dras tillbaka ut ur deponeringshålet, se figur 8-4. Ett annat alternativ är att använda sig av hydrauliska handborraggregat. Eftersom berget kan ha en hög tryckhållfasthet (cirka 200 MPa) även inom ett svagare parti är en utvidgning med hjälp av roadheader i nuläget inte något rimligt alternativ.



Figur 8-4. Profilutvidgning med uppvinning av kuttrar.

De bergblock som kommer att väljas för deponeringen bör dock inte innehålla partier som kräver denna typ av åtgärder.

Tillverkare

I detta avsnitt presenteras exempel på olika maskiner för borrar av tunnlar med små diametrar. Maskinerna har främst tagits fram för borrar i mjukt berg, men det är möjligt att modifiera dem så att de även kan användas för borrar i hårt berg. Detta har också demonstrerats.

Marknaden för TBM är mycket liten idag. Det finns ett fåtal tillverkare av TBM-maskiner för hårt berg i världen, t ex Robbins, Herrenknecht och Wirth-Soltau. De flesta TBM-maskiner som tillverkas och säljs är specialanpassade med avseende på t ex

- Kraftmatning.
- Hantering av borkax.
- Kringsystem för bergförstärkning, injektering etc.

Kraven på TBM-maskinen ställs av projektets speciella förutsättningar med avseende på geologi, tunnllängder, tidsplan etc.

Även tillverkare av TBM-maskiner för medelhårt berg kan vara intressanta partners för diskussion om utveckling av lämplig utrustning för borrar av deponeringshål vid horisontell deponering.

RBM

Stigortsborrar innebär att man i ett eller flera steg rymmer ett pilothål tills det når slutlig diameter. Tekniken har ursprungligen utvecklats för att driva vertikala schakt från en nivå till en annan. Numera kan man även driva horisontella hål från ett utrymme till ett annat med hjälp av stigortsborrar. Maskinen för drivning placeras i ett utrymme i berget. Kraften överförs via borrarsträngen till borrarhuvudet som rymmer hålet till slutlig diameter.

Under senare år har också rymning provats från samma hål som pilothålet genom sk blindbollar. Flera lyckade försök med blindbollar finns dokumenterade. Vid Kvänums pumpfabrik i Norge drevs ett cirka 50 meter djupt schakt med diametern 1,5 meter. Kaxet transporterades bort med jetpumpning genom borrarsträngen. Vid det finska kärnkraftverket Olkiluoto borrades tre cirka 7,5 meter djupa deponeringshål med diametern 1 524 mm. Kaxet transporterades bort med hjälp av vacuumsugning genom borrarsträngen.

Borringen av pilothålet måste också ske med stor noggrannhet eftersom det avgör raket och toleranser för det slutliga hålet.

Vid blindbollar med RBM är det nödvändigt att borrarsträngen stöds mot bergväggen med stabilisatorer. Centrerung och stabiliseringen av borrarsträngen måste bygga på att borrarsträngen förblir parallell med borrarriktningen.

Vid blindbollar kan hanteringen av borkax ske på två olika sätt:

- Kaxet kan spolats ut över styrmekanismens anslutning mot berget. Detta kan lösas genom att stabilisatorerna utformas som hjul med ekrar. Anslutningen mot berget görs med en platta, där spolvatten med kax kan rinna fritt över konstruktionen.

- Kaxhanteringen sker genom att slurry pumpas genom borrarsträngen. Detta kräver dock stora vattenmängder samt att kax och slam separeras så att vattnet kan återanvändas. Eventuellt kan kaxet hanteras med vakuumsug. Det förutsätter emellertid att borkaxet är relativt torrt.

Vid konventionell stigortsborrning mellan två tunnlar kan kaxhanteringen ske genom ett skrapspel som monteras på baksidan av borrhuvudet.

8.1.2 Borrprestanda

Sammanställningen av borrardata och borrprestanda för respektive maskin i tabell 8-1 är ungefärlig. Den bygger på uppgifter från tillverkare, entreprenörer och gjorda uppskattningar.

Tabell 8-1. Borrprestanda för olika maskintyper.

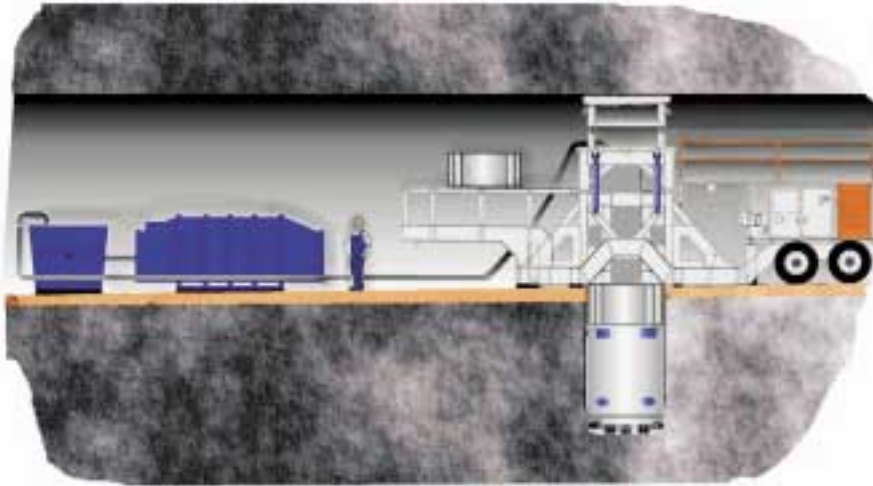
Rubrik	Enhet	Vattenhammare	TBM	RBM
Längd av maskin standard. special	m	Normalt borraggregat	6–10 5–7	2–3
Min/max längd på tunnel	m	0/300	0/>1000	0/800
Indrift	m/tim.	3–5 per cluster	3	1
Effektiv borring	m/vecka	100 (full diameter)	100	150
Styrning		Genom förborring av pilothål	Genom maskinen	Genom förborring av pilothål
Precision, xyz	%	0,1	0,1	0,1
Jämnhet	cm	0,2	3–5 ¹	1–2
Kraftförsörjning		Högtrycksvatten	Hydraulik	Hydraulik/ mekaniskt

¹Med ett väl konstruerat styrsystem bör det vara möjligt att uppnå samma texturdjup som för RBM, 1–2 cm.

8.1.3 Erfarenheter av borrarutrustningar

Uppåtriktad borring med cluster utförs kontinuerligt i LKAB:s gruvor i Kiruna i dimensionen 700 mm. Clusterborring i horisontell led har utförts i Norge med dimensionen 700 mm samt i ett pågående projekt i Japan med håldiametern cirka 1 meter.

Under 1998 och 1999 användes TBM-teknik för att borra 13 stycken vertikala deponeringshål i Äspölaboratoriet, se figur 8-5. Hålen är 8–9 meter djupa och har en diameter av 1,75 meter. Tekniken baserade sig på samma teknik som vid borring av horisontella tunnlar. Utrustningen måste dock modifieras för att borra vertikalt. Kraften på borkronan åstadkoms till exempel med hjälp av domkrafter mot tunneltaket. Dessa ersatte de konventionella gripparna. Sänkningen av borkronan under borringen skedde genom att distansrör sattes in successivt. På så sätt kunde domkrafterna ta stöd mot taket under hela borrsjunkningen.



Figur 8-5. Borrutrustningen i Äspölaboratoriet.

Det unika med borrningarna i Äspölaboratoriet var att borrkaxet avlägsnades med hjälp av vakuumsugning. Vid borrning av horisontella tunnlar sker detta för det mesta med hjälp av bandtransportörer. Borrningen i Äspölaboratoriet fungerade bra med avseende på raket, borrhållsjunkning och jämnheten hos borrhålets vägg.

Det amerikanska företaget Boretec levererade utrustningen till Äspölaboratoriet. Boretec köptes senare upp av borrhöret Robbins, och marknadsför sig nu under detta namn.

8.1.4 Jämförelse av bormetoder

Förutom tekniken med clusterbörning med vattenhammare finns det idag flera fungerande TBM-maskiner för att borra 100–500 meter långa tunnlar med en diameter på 1,5–2 meter. Gemensamt för samtliga maskiner är att de kan anpassas efter kundens önskemål. Eftersom de ingående komponenterna redan är väl utprovade krävs endast en begränsad utvecklingsinsats för att framställa en maskin som är lämplig för borrning i hårt berg.

Vid designen av borrutrustningen är det viktigt att beakta följande:

- Alla funktioner ska kunna fjärrstyras från transporttunneln.
- TBM-maskinen måste ha fyra uppsättningar gripprar för att kraften och precisionen ska bli tillräcklig.
- TBM-maskinen bör vara kort (segmenterad) och inte kräva nischer i transporttunnlarna för att kunna starta borrningen.
- Tiden för att flytta maskinen mellan tunnelpåslagen ska minimeras.
- Borrningen ska ha god precision.
- Borrningen ska vara skonsam mot berget.
- Förinjektering ska kunna utföras i eller i omedelbar anslutning till bormaskinen.
- Kuttrarna ska kunna bytas enkelt och effektivt.

- Krafttillförseln till maskinen ska kunna ske från transporttunneln.
- Borrmaskinen ska ha en effektiv utlastning av kax.

I tabell 8–2 finns en sammanfattande jämförelse av de olika borrar metoderna.

Tabell 8-2. Jämförelse av borrar metoder.

Borrar metod	Fördel	Nackdel
Vattenhammare i clusterformation	<ul style="list-style-type: none"> + Endast vatten används för att krossa berget. Inga hydrauliska utrustningar förekommer i deponeringshålet. + Utrustningen är uppbyggd av konventionella delar. + Slagstiften har relativt hög livslängd. Slipning eller byte av slagstiften är enkel att utföra men kräver att borrarsträng och cluster plockas ut ur deponeringshålet. + Borrningen sker utan omtag varför väggarna blir rakare än för TBM. + Utrustningen kan snabbt ställas upp och längden på borrarstängerna kan anpassas till tillgängligt utrymme. 	<ul style="list-style-type: none"> – Tekniken att använda vattenhammare i clusterform har inte utnyttjats för dimensioner över 1 meter. – Varje vattenhammare kräver relativt stor mängd vatten varför recirkulation av vattnet med sedimentering och filtrering krävs. – Rakheten på deponeringshålet kommer att vara beroende av rakheten på kärnborrhålet för karakterisering. – Borrningen genomförs i flera steg vilket kräver längre tid. – Injektering går inte att utföra i samband med borrning.
TBM	<ul style="list-style-type: none"> + En TBM kan styras med stor precision under borrning. + TBM-tekniken är väl beprövad och drivning i hårt berg har utvecklats under cirka 20 år. + Hanteringen av kax är för samtliga metoder väl beprövad. + Mycket långa tunnlar kan borraras. + TBM-utrustning finns med rationell kaxhantering och styrning. 	<ul style="list-style-type: none"> – Etableringstiden för varje borrhål är normalt lång. I detta ingår tider för etablering, avetablering samt flytt mellan borrhål. En TBM som kan utnyttja ett startrör torde emellertid ha kortare uppställnings- och flyttider. – Maskintypen har låg tillgänglighet för borrning. Cirka 30–40 % av tiden används för service och reparationer. – TBM har hittills endast i liten omfattning använts i hårt berg. – Svårt att byta kuttrar.
RBM	<ul style="list-style-type: none"> + Etablerad och väl beprövad teknik, dock inte för blindborrning. Har använts under cirka 30 år. + Maskinen har en kort etableringstid. + Maskinen borrar normalt med mer än 90 % tillgänglighet. + Teknik finns utvecklad för styrning av pilotkrona och rymning. 	<ul style="list-style-type: none"> – Tekniken för horisontell blindborrning är endast prövad i mindre omfattning. – Om extra tunnel byggs minskar den ekonomiska vinsten med horisontell deponering. – Ny design av stabilisatorer erfordras. – Tekniken för kaxhanteringen är dåligt utvecklad och besvärlig (avser blindborrning).

Vår bedömning är att horisontell stigortsborrar idag inte är någon intressant teknik för borrning av blinda deponeringshål. De största svårigheterna har samband med hanteringen av borrarsträng, förinjektering och tekniken för att stabilisera borrarsträngen.

8.2 Program

Tekniken för att borra tunnlar i hårt berg med den aktuella diametern kan anses vara relativt väl dokumenterad. Ytterligare utveckling och förbättring av teknik och utrustningar sker ständigt genom olika infrastrukturprojekt.

Aktiviteter

Följande insatser behöver dock göras:

- På samma sätt som SKB idag i Äspölaboratoriet visar att referensutformningen går att genomföra i praktiken, bör vi också göra detsamma för horisontell deponering. En cirka 50 meter lång demonstrationstunnel bör därför borraras i Äspölaboratoriet.
- Speciellt anpassad utrustning kommer att krävas oberoende om vi väljer tekniken med vattenhammare i cluster, TBM eller RTB. Clustertekniken bedöms dock som betydligt enklare men vissa grundläggande frågor kring vattenhantering med kaxtransport, sedimentation och filtrering samt deponeringshålets raket etc måste besvaras innan val av borrhingsmetod kan göras.
- Deponeringstunnel för demonstration av KBS-3-metoden med horisontell deponering bör passera lokala mindre sprickzoner för att testa behovet av injektering.
- Pluggning av demonstrationstunneln bör även ingå i demonstrationen och beskrivs närmare i kapitel 10.
- Vid utformningen av borrhutrustningen måste speciell möda ägnas åt driftsäkerhet på utrustningen, utmatningen av borrhax och alla hjälpfunktioner och att kraven på personsäkerhet är uppfyllda.
- Möjligheten att borra raka pilothål behöver studeras.
- Acceptabla avvikelser och toleranser för deponeringshålet måste definieras utifrån deponeringsätt/utrustning.
- Optimeringsstudier av borrhmetod bör genomföras.

9 Injektering och förstärkning

9.1 Kunskapsläge

SKB har bedrivit utveckling och demonstration av tätning i berg sedan 1980-talet. I Stripaprojektet studerades fintätning av närområdet kring deponeringshål /33/ och i Projekt Injektering /34/ studerades tätning av större vattenförande diskontinuiteter. Erfarenheterna från åren 1996–2000 har sammanfattats i en rapport /35/.

Platsundersökningen och detaljundersökningen under byggnadsskedet kommer att generera en stor mängd data om den aktuella platserna. Fortsatt detaljundersökning från transporttunnlarna ger goda möjligheter att minska osäkerheten i data från platsundersökningsskedet. Både på Äspölaboratoriet och på den slutliga platsen kommer borrningen av varje deponeringshål att föregås av ett sonderingshål (kärnborrhål) i vilket diverse geofysiska undersökningar görs. Sonderingshålen kommer att placeras i deponeringshålets centrumpunkt om borrning med vattenhammare i cluster eller RBM-teknik väljes för borrning av deponeringshålen. Avståndet mellan kärnborrhålet och deponeringshålets periferi kommer således att uppgå till cirka 0,9 meter. Dessutom kommer undersökningar i närliggande tunnlar att generera ytterligare information. Tillsammans ger detta en god säkerhet för prognoser.

9.1.1 Injektering

Injekteringen av berget runt deponeringshålet syftar i första hand till att minska inläckaget av vatten till en sådan nivå att bentonitbufferten inte eroderas under deponeringsprocessen. Mängden vatten efter injekteringen beror på bergmassans hydrauliska konduktivitet och resultatet av injekteringen.

Resultaten av injekteringen måste kunna verifieras och kvantifieras. Detta kräver i sin tur att berget kan karakteriseras och beskrivas på ett sådant sätt att man kan välja en injekteringsteknik som ger en tillräcklig utfyllnadsgrad och mekanisk stabilitet. Dessutom måste injekteringsmedlets kemiska interaktion med grundvattnet och övriga material i djupförvaret kunna beskrivas och kvantifieras på ett sådant sätt att det kan beaktas vid de säkerhetsanalyser som ska genomföras.

I samband med drivningen av rampen i Äspölaboratoriet konstaterades att beprövade lösningar inte finns för alla situationer. Då uppdagades framför allt problemet med högt vattentryck i transmissiva diskontinuiteter. Oavsett vilka diskontinuiteter som ska åtgärdas måste lämpliga insatser baseras på kunskaper om sprickor och materialegenskaper, samt på val av utrustning med tillfredsställande prestanda.

Tätningens arbeten bedrivs lämpligen som förinjektering. Teknik för förinjektering av tunnlar finns tillgänglig och användes vid TBM-borrningen av stora nerfartstunneln från nivå –420 meter till nivå –450 meter i Äspölaboratoriet.

I alternativet med användning av TBM kan injekteringsutrustningen integreras med bormaskinen. En kompletterande tätning av berget kring tunneln kan dessutom genomföras i form av en efterinjektering oavsett drivningsmetod.

Krav på injekteringen

Vilken nivå på tätningen som kommer att krävas och om detta är möjligt att uppnå styrs av följande faktorer:

- Hur stort inläckage (för en enskild spricka respektive för ett helt deponeringshål) som kan tillåtas för att inte bentoniten ska erodera.
- Geohydrologiska förhållanden som hydraulisk konduktivitet och lokala gradienter.
- Tekniska möjligheter att injektera berget från sonderingshål och förinjekterings-skärmar, eventuellt kompletterat med efterinjektering. Detta kräver utveckling av injekteringsmetodik och injekteringsutrustningar och sannolikt också en integrering av injekteringsutrustningen med TBM i det fall denna teknik väljes.
- Kravet att högt pH i förvaret inte ska påverka bentonitens svällningsförmåga. Vilka begränsningar detta innebär, till exempel när det gäller mängden betong i förvaret, utreds för närvarande i ett samarbetsprojekt mellan SKB och Posiva, Finland.

Dokumentation av vilka krav på injekteringen som har ställts vid bygget av olika berganläggningar i Sverige, dokumentation av andra pågående projekt samt de forsknings- och utvecklingsprojekt som genomförs kommer under de närmaste åren att ge ett bättre beslutsunderlag för att ställa relevanta krav vid injektering och bedömning av resultatet av utförda injekteringar.

Strategi för injektering

SKB kan redan idag förutse att följande strategi för injekteringsarbeten kommer att följas:

- Förinjektering kan i viss omfattning ske från det sonderingshål som borrar längs tunneln innan borrhningen av deponeringshålet påbörjas.
- Förinjektering utföres i erforderlig omfattning i samband med borrhning.
- Inga förstärkningsarbeten sker under borrhningen av deponeringshålen. Förstärkningsarbeten som sker av säkerhetsskäl är dock undantagna. Sannolikheten för att detta ska krävas är låg.
- Efterinjektering och förstärkning görs efter det att borrhningen avslutats och borrhutrustningen avlägsnats ut deponeringshålet.
- Avsnitt med sprickzoner med stark vattenföring kommer inte att utnyttjas för deponering.

Injektering av större sprickzoner kräver mer avancerad utrustning än den som kan integreras med borrhutrustningen. Vid injekteringen tas då borrhutrustningen ut ur deponeringshålet och injekteringsutrustningen transporteras in.

Om den inläckande vattenmängden är större än en given acceptabel nivå måste kompletterande efterinjekteringar ske. Sådana sker inifrån deponeringshålet på ett visst avstånd från det läckande partiet. På så sätt är det möjligt att nå tillräckligt långt in i berget för att få tillräckligt mottryck på det injekterade materialet. Efterinjekteringen är normalt en osäker metod.

Vid stora vattenflöden kan det bli nödvändigt att fodra en del av deponeringshålet. Tunneln måste då rymmas för att inklädnaden inte ska inkräkta på tunnelns tvärsnitt. Vid

användning av TBM är det möjligt att göra detta genom att vinkla de kuttrar som sitter i kransen av borrhuvudet samtidigt som maskinen dras tillbaka ut ur tunneln.

På de ställen där längden hos en vattenförande sprickzon är entydig kan man göra en ursparing i berget och installera ett foderrör i stål eller betong och fylla utrymmet mellan foderröret och berget med betong. Vattenförande sprickzoner har emellertid sällan en skarp gräns mot sidoberget. Det kan därför vara svårt att avgöra hur lång tätningen måste vara.

9.1.2 Förstärkning

Det cirkulära tvärsnittet på deponeringshålet och dess begränsade diameter ger goda förutsättningar för att den ska bli stabil. Om förstärkningsåtgärder bedöms nödvändiga kommer berget i första hand att förstärkas med hjälp av bultar. Bultarnas uppgift är att låsa block som kan falla ut. I allmänhet kommer bultar med längder upp till tunneldiametern att räcka. Om längre bultar behövs kan dessa skarvas. I partier där berget är svagt kan det bli nödvändigt att komplettera bultningen med sprutbetong eller nätning. Tunneldiametern måste då rymmas, så att inte förstärkningen inkräktar på den teoretiska diametern. Erfarenheter från tidigare tunneldrivningar i hårt berg visar att förstärkning med sprutbetong och nätning endast blir aktuellt i undantagsfall.

Innan deponeringen påbörjas ska hålen efter eventuella bergutfall i deponeringshålet fyllas igen.

Valet av materialet i förstärkningselementen styrs av:

- Grundvattnets sammansättning.
- Den tid som tunnlarna förväntas stå öppna.
- Förvarets långsiktiga funktion och säkerhet.

Händelser som kan försvåra deponeringen är:

- Ett bergblock faller ner från tunneltaket framför eller bakom deponeringsmaskinen under pågående deponering.
- Tunneln deformeras så mycket att deponeringen inte kan genomföras.

Tunnlarna kommer att besiktigas och vid behov säkras mot blockutfall innan deponeringen inleds, varför risken för blockutfall och störningar under deponering är ytterst liten.

9.2 Program

9.2.1 Injektering

Kravet på injekteringens livslängd är en fråga som måste besvaras, men injekteringen har ingen långsiktig säkerhetsfunktion. Under deponeringsfasen får inläckaget till deponeringshålet inte vara så stor att bentoniten i distanspluggarna eroderas. De hydrauliska gradienterna kan under denna period vara stora lokalt, eftersom deponeringshålet är öppet. När deponeringshålet är fyllt och pluggat stiger grundvattennivån och risken för

erosion upphör liksom betydelsen av injekteringen. En viktig fråga i detta delprogram är därför att utreda hur lång livslängd injekteringen måste ha.

Ytterligare kunskap om injekterings betydelse för pH-värdet i förvaret beräknas framkomma vid det projekt som Posiva och SKB gemensamt genomför.

Eftersom deponeringshålen enligt planerna kommer att borraras med vattenhammare i cluster eller med en TBM med en ganska liten diameter medför detta att förinjektering måste utföras med specialanpassad utrustning. Borrning med clusterutrustningen kommer att kräva att borrarutrustningen avlägsnas från tunneln och en separat injekteringsutrustning körs in. För TBM bör det undersökas om det är möjligt att integrera injekteringsutrustningen med bormaskinen, se även kapitel 8. Alternativet att dra tillbaka hela eller en del av borrarutrustningen och använda en separat injekteringsutrustning. Detta kommer att innebära många tidsödande arbetsmoment.

Ett alternativ till förinjekteringstrumpeter utförda i samband med borrningen kan vara att utveckla en metod för att förinjektera direkt i det kärnborrhål som borraras för karakterisering av deponeringstunneln. Olika hydraultester, manschettmätningar och liknande utförs sedan sektionvis i kärnborrhålet. Vilka mätningar som utförs och var de görs beror på resultaten av kärnkarteringen. Resultatet av mätningarna utgör sedan grunden för ett injekteringsprogram för varje borrhål. Kärnborrhålet injekteras sektionvis inifrån och ut. Metoden kräver utveckling av både manschetter och injekteringsutrustning för denna speciella tillämpning. Speciella frågeställningar som bör belysas är lämpliga injekteringsrecept och vilka tryck som är möjliga att använda med hänsyn till omgivande deponeringshål.

Borrning med clusterutrustningen kräver dessutom att kärnborrhålet borraras upp på nytt.

Vid den förinjektering som utförs som förinjekteringstrumpet framför tunneln krävs möjligheter att rikta hål i vinkel mot tunnelriktningen för att nå spricksystem som är parallella med deponeringshålet. Denna flexibilitet är nödvändig för att uppnå goda resultat vid kompletterande injekteringar. Utrustningen för detta ska vara anpassad för trånga utrymmen.

Aktiviteter

Följande insatser bör göras beroende på vilken bormetod som väljs:

- Utveckling av injekteringsmetodik och –utrustning för sektionvis injektering i kärnborrhål.
- Utveckla injekteringsutrustning som kan användas för injektering framför fronten efter det att borrarutrustningen plockats ut.
- Om TBM ska användas bör utrustning för att utföra förinjekteringskärmar integreras med maskinen och utföras fjärrstyrt.

I samband med borrningen av en demonstrationstunnel i Äspölaboratoriet bör nedanstående moment testas med den valda bormetoden:

- Sektionsvis förinjektering av ett långt kärnborrat sonderingshål. Både metodik och teknik måste demonstreras.
- Flexibiliteten mellan borrning och förinjektering och/eller bergförstärkning.

- TBM-borrning (om denna metod väljs) med integrerade förstärknings- och injekteringsfunktioner.
- Profilutvidgning av tunneltvärsnittet med TBM (om denna metod väljs) och med speciellt fräsaggregat samt fodring av deponeringshålet.

9.2.2 Förstärkning

Behovet av förstärkning bedöms vara mycket begränsat med hänsyn till att bergkvaliteten inom deponeringsområdet förmodligen är god samt att tunnelarean är liten. Det bör dock finnas möjligheter till driftförstärkning nära drivningsfronten.

Metoden för installation av bergbult bör vara så enkel som möjligt på grund av det trånga utrymmet i tunneln. Borrning för bultning och bultsättning bör utföras från ett, för det cirkulära tvärsnittet specialanpassat fordon.

På marknaden finns idag ett antal olika bulttyper med delvis olika funktion. Kraven på bergbult för deponeringstunnlarna bör utredas vidare. Livslängden behöver inte uppgå till mer än ett fåtal år. Eftersom deponeringshålerna ligger på stort djup med höga bergspänningar bör bergbultar som har förmåga att ta upp last längs hela längden användas. Den metod som idag bedöms som lämpligast är Swellexbultar. Swellexbulten finns i en skarvbar version som kan användas då man behöver en bultlängd som är större än deponeringshålets diameter. För att inte bulthålen ska öka risken för inläckage av vatten till deponeringshålerna bör också metoden för tätning av bulthålen och samverka med injekteringen utredas.

Aktiviteter

Följande insatser bör göras i samband med tillredning av ett deponeringshål för demonstration i Äspölaboratoriet:

- Ett fjärrstyrt borr- och bultaggregat bör utvecklas så att fräsning och urborrning, borring för bult samt bultsättning kan utföras i ett moment.
- Fräsning av tunneltvärsnittet bör ske med hjälp av TBM eller med ett speciellt utvecklat fräsaggregat.
- En separat eller med bormaskinen integrerad utrustning för driftförstärkning genom borring och bultsättning nära drivningsfronten bör tas fram.
- I samband med drivandet av en demonstrationstunnel i Äspölaboratoriet bör bultsättning med ett borr- och bultaggregat med utrustning för fräsning/urborrning för bultbricka och testas med den valda bormetoden.

10 Deponeringsteknik

Den deponeringsmetod som väljs bör ha följande egenskaper:

- Deponeringen ska ske så att god kvalitet uppnås både vad det gäller driftsäkerhet och resultat.
- Hela deponeringsprocessen måste vara fjärrstyrd och reverserbar under alla skeden.
- Distansenheter av kompakterad bentonit mellan deponeringsbehållarna ska skyddas mot vatten och mot mekaniska skador under transporten in i deponeringshålet.
- Deponeringshålets väggar ska inte utsättas för sådana mekaniska påfrestningar att de skadas eller att bergflisor lossnar.
- Fördelningen av bentonit runt kapseln måste vara jämn för att inte erhålla ojämna svälltryck och excentrisk kapselposition.

I JADE-projektet beskrevs tolv olika deponeringsmetoder översiktligt /15/. Tio av dessa bygger på deponering i paket och två bygger på separat deponering av buffert respektive kapsel.

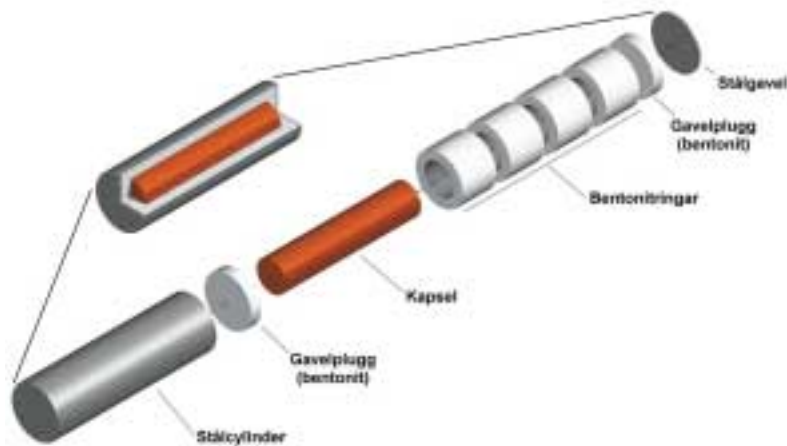
Deponeringen bör enligt slutsatserna i JADE-studien ske i paket med kapsel och buffert som en enhet sammanhållen av en perforerad deponeringsbehållare. Internationella kontakter inom ramen för detta projekt har visat att separat deponering av kapsel och buffert kan ha vissa fördelar. Samma princip att hålla samman bufferten med en deponeringsbehållare kan användas även vid separat deponering. Då krävs emellertid separata utrustningar för att placera buffert respektive kapsel. Vissa delar av utrustningen kan förenklas, eftersom bufferten kan placeras utan krav på strålskärning. Paketens vikt blir också lägre. I denna studie har det dock bedömts motiverat att hålla fast vid JADE-projektets slutsatser och enbart undersöka alternativet med deponering av hela paket.

I JADE-studien bedömdes alternativet med paket med kapsel och buffert sammanhållet av ett perforerat skyddsror, som kan glida på botten av deponeringshålet, att ha den största utvecklingspotentialen. I det nya koncept som utvecklats i samband med detta projekt placeras bufferten och kapseln i en deponeringsbehållare, se figur 10-1. Ett lock svetsas fast på deponeringsbehållaren som tillsammans med kapseln och bufferten utgör ett deponeringspaket.

Deponeringsbehållaren kan vara tät eller perforerad. Hålstorlek och perforeringsgrad kan variera. I detta sammanhang är det viktigt att påpeka att deponeringsbehållaren inte har någon funktion för den långsiktiga säkerheten. Dess uppgift är endast att underlätta deponeringen.

För att uppnå erforderligt avstånd mellan kapslarna för att inte överskrida tillåten temperatur i bentoniten placeras distansenheter av bentonit mellan deponeringspaketen. Dessa har preliminärt samma täthet som bentonitblocken i referensutformningen.

Inom ramen för detta projekt har även vissa grundläggande utredningar gjorts när det gäller utformningen av utrustningen för transport och deponering. Dessa kan ses som ett första steg i den förstudie som föreslås bli inledningen på ett forsknings-, utvecklings-



Figur 10-1. Deponeringspaket med ingående delar.

och demonstrationsprogram för horisontell deponering. Resultatet av dessa grundläggande utredningar redovisas nedan i avsnitt 10.1.

10.1 Kunskapsläge

Deponeringstekniken för horisontell deponering kan indelas i tre moment:

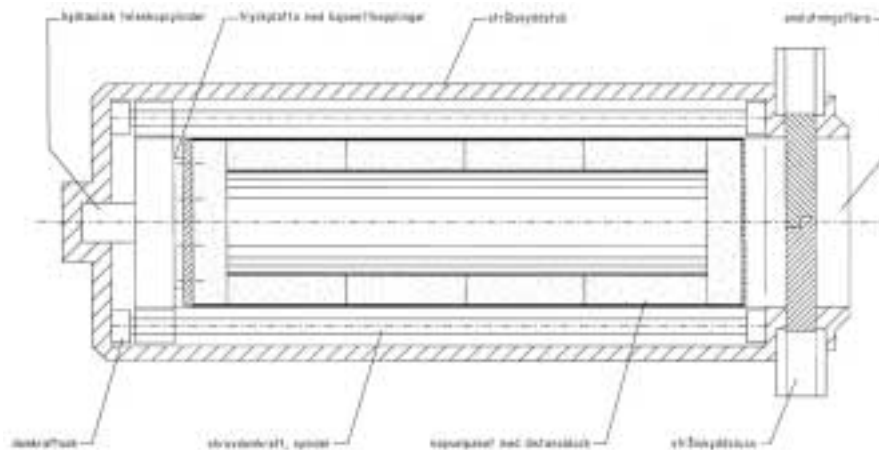
- **Omlastning av kapseln från transportbehållare till deponeringsbehållare.** Denna hantering förutsätts ske i en omlastningsstation. Bufferten staplas först i deponeringsbehållaren. Kapseln förs sedan över från transportbehållaren till deponeringsbehållaren och deponeringsbehållaren försluts. Det förslutna deponeringsbehållaren, deponeringspaketet, placeras i en strålskyddstubb för vidare transport till deponeringstunneln.
- **Transport i tunneln.** Denna hantering omfattar de moment som måste genomföras från det att specialfordonet lämnar omlastningsstationen med deponeringspaketet i en strålskyddstubb till dess att tuben placeras vid deponeringshålets mynning.
- **Deponering.** Denna hantering omfattar alla de moment som måste genomföras från det att deponeringsbehållaren befinner sig vid deponeringshålets mynning tills att det befinner sig i sin slutliga deponeringsposition.

10.1.1 Omlastning och paketering

Omlastningsstationen i ett KBS-3-förvar med horisontell deponering har stora likheter med sin motsvarighet i referensutformningen. Alla arbetsmoment i omlastningsstationen måste ske på ett sådant sätt att personalen hela tiden är skyddad från strålning. Det enda moment som kan utföras utan strålskydd är när bentonitblocken staplas i deponeringsbehållaren.

Hantering av bufferten

Den tomma deponeringsbehållaren placeras i en strålskyddstubb, se figur 10-2. Tuben står uppställd på en vagn på räls nere i en kanal med anslutning till hanteringscellen. Dess



Figur 10-2. Strålskyddstuben och dess ingående enheter.

uppgift är att utgöra en komplett hanteringsenhet och ska också användas för att ge strålskydd under transport och vid placering av deponeringspaketet i deponeringshålets mynning.

När deponeringsbehållaren är på plats i strålskyddstuben kan bufferten börja byggas upp. Det 350 mm tjocka bottenblocket av högkompakterad bentonit lyfts ned med ett verktyg. Verktøget har vakuumblockor för att åstadkomma lyftkraften. Denna teknik är väl beprövad och har använts vid lyft av cirka 100 buffertenheter från pressformen för projekten Återtag och Prototypförvaret i Äspölaboratoriet.

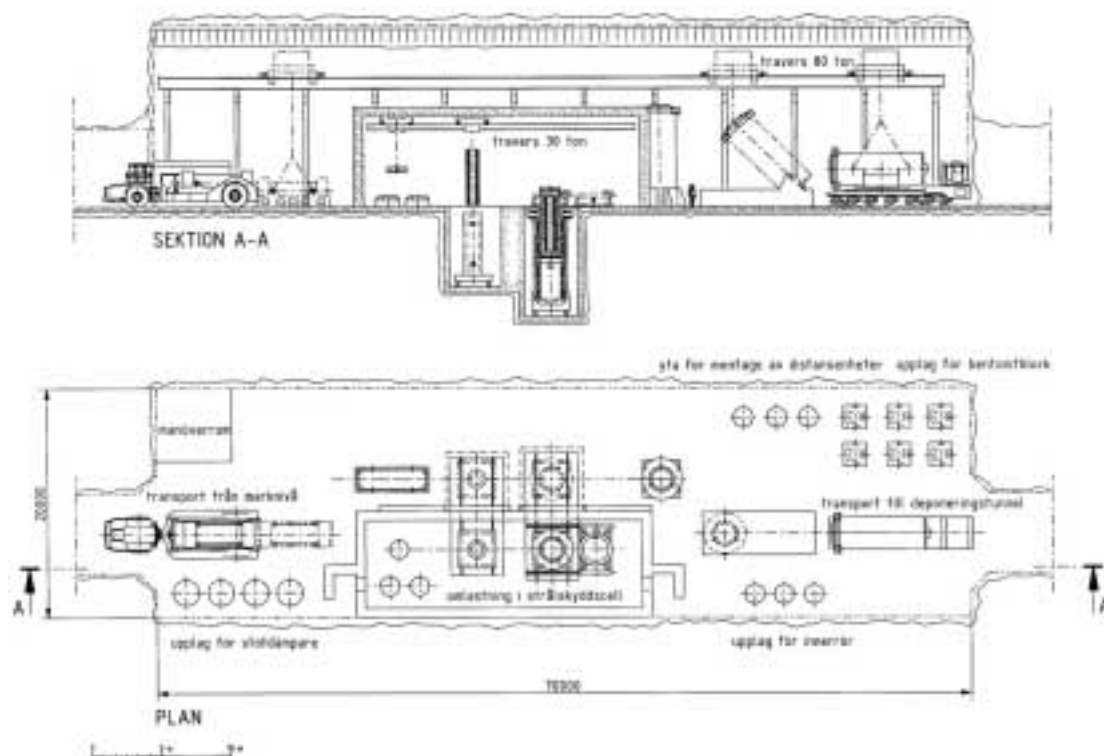
Buffertringarna kan lyftas med vakuumblockor på samma sätt som buffertblocken. Lyftkraften blir dock mindre, eftersom ringarna har mindre yta. Mekaniska verktyg som greppar underifrån och från ringens insida är också en möjlig lösning som skulle ge en mycket säker hantering. Buffertringarnas totala höjd ska motsvara kapselns. Antalet ringar i stapeln kommer att bestämmas med utgångspunkt från vad som är mest fördelaktigt ur teknisk och ekonomisk synvinkel. Hänsyn bör tas till pressning, hantering i anslutning till pressningen, maskinbearbetning och slutligen transport och inplacering i deponeringsbehållaren. Preliminärt placeras även det 350 mm tjocka toppblocket och deponeringsbehållarens lock i strålskyddstuben innan den flyttas in i hanteringscellen.

Eftersom det i detta moment inte rör sig om någon hantering av radioaktivt material kan strålskyddstubens strålskyddssluss vara öppen under hela hanteringssekvensen. Den fyllda tuben flyttas in i hanteringscellen där deponeringsbehållarens lock och det översta bentonitblocket lyfts bort.

Hantering av kapseln

Det inkapslade använda kärnbränslet anländer till omlastningsstationen i en transportbehållare, se figur 10-3. Transporten sker med hjälp av truck. I omlastningsstationen placeras transportbehållaren i en transportkanal på motsvarande sätt som strålskyddstuben. Transportbehållaren förbereds för tömning. Därefter flyttas transportbehållaren in i hanteringscellen via strålskyddsporten i kanalen.

Väl inne i hanteringscellen kan transportbehållarens lock lyftas av och kapseln flyttas från transportbehållaren till deponeringsbehållaren med bentonit. Detta sker med samma typ av lyftverktyg som redan har använts i Kapsellaboratoriet och i den prototyp till deponeringsmaskinen för vertikal deponering som idag finns på Äspölaboratoriet. Hanteringscellen kommer att vara utrustad med en travers med 30 tons kapacitet i huvudlyftet och



Figur 10-3. Omlastning av kapseln från transportbehållare till deponeringsbehållare.

ett hjälplyft på 5 ton. Alternativa lösningar för att utforma traversen finns (teleskop eller med konventionella linspel). För att underlätta inplaceringen av kapseln i deponeringsbehållaren kan den senare placeras ovanför strålskyddstubens överkant med hjälp av interna skruvdomkrafter i strålskyddstuben. När kapseln är på plats i deponeringsbehållaren kan det översta bentonitblocket och locket läggas på.

Svetsning av lock

Preliminärt förutsätts att deponeringsbehållarens lock svetsas fast i en svetsautomat. Det är nödvändigt att ytterligare lyfta deponeringsbehållaren med domkrafterna i strålskyddstuben för att underlätta utformningen av svetsutrustningen och de hjälputrustningar som kommer att krävas. En skyddskrage kommer att placeras på toppen av strålskyddstuben så att inte svetspärlor eller föroreningar kommer ner i strålskyddstuben under arbetet. Detta skulle annars kunna orsaka driftstörningar.

När svetsarbetet är avslutat och nödvändiga kontroller har utförts kan den förslutna deponeringsbehållaren sänkas ned i strålskyddstuben och dess strålskyddssluss stängs. Efter detta är strålskyddstuben komplett. Den kan då transporteras ut ur hanteringscellen. Strålskyddstuben lyfts nu upp på det fordon som används för transporterna mellan omlastningsstationen och deponeringshålet.

10.1.2 Transport i tunneln

En av slutsatserna i JADE-projektet var att även transporten från omlastningsstationen till deponeringshålet bör ske under strålskyddade förhållanden. Detta är således en förutsättning för utvecklingsarbetet av den utrustning som krävs för transporten och deponeringen.

Utformningen av det fordon som kan komma till användning förutsätts vara baserat på en hjulbunden plattformsvagn av samma typ som idag används för att transportera transportbehållare. Denna typ av vagnar har mycket goda möjligheter till positionering och kan även utformas så att hjulen kan vridas 90 grader.

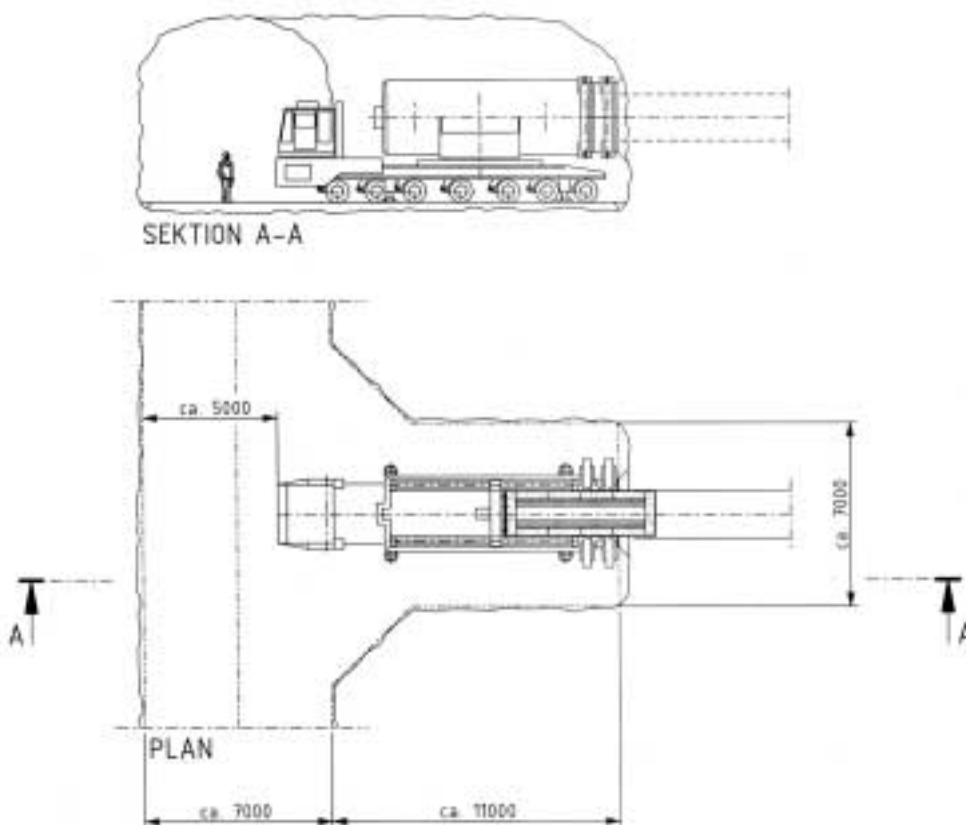
I omlastningsstationen placeras strålskyddstuben på flaket av vagnen riktad så att strålskyddstuben ska kunna ansluta mot den fläns som finns vid deponeringshålet.

När strålskyddstuben har placerats i rätt läge transporteras vagnen till deponeringshålets mynning.

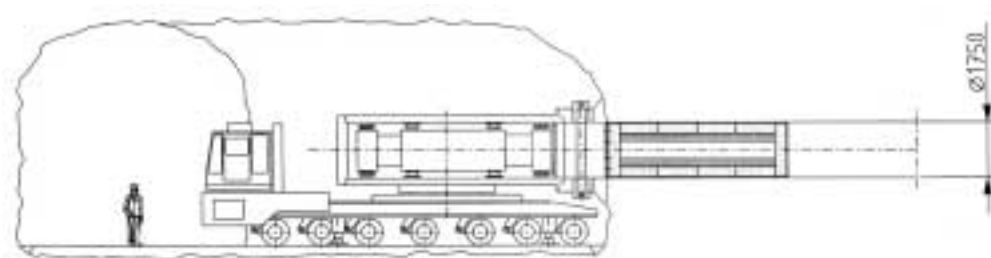
10.1.3 Deponering

Deponeringshålets mynning är också utrustat med en strålskyddssluss. När strålskyddstuben har rätt position, nivå och riktning vid deponeringshålets mynning kan läget fixeras och strålskyddsslussarna öppnas, se figur 10-4. Överföringen av deponeringspaketet kan då inledas. Denna sker med hjälp av först de interna skruvdomkrafterna och slutligen med kolven i strålskyddstuben.

Deponeringspaketet måste förflyttas så långt in i tunneln att det kommer innanför deponeringshålets strålskyddssluss. Slussarna stängs och strålskyddstuben lossas från anslutningen till deponeringshålet. Fordonet kör från platsen för att lämna av strålskyddstuben i omlastningsstationen. Därefter återvänder det med deponeringsmaskinen i sin starttub. Transporterna kan skötas av två olika fordon om detta behövs av kapacitetsskäl.



Figur10-4. Dockning av strålskyddstuben mot strålskyddsslussen i deponeringshålets mynning.

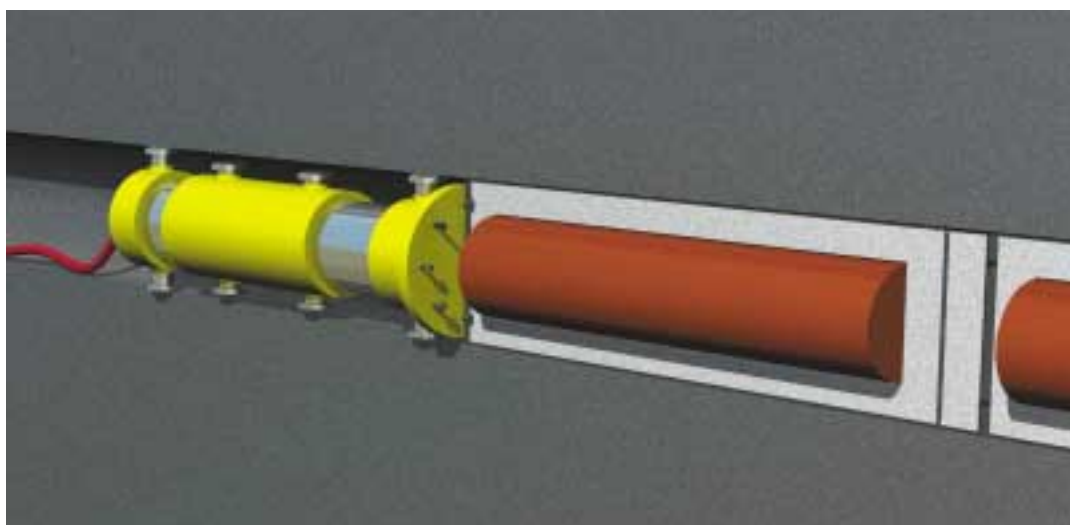


Figur10-5. Dockning av deponeringsmaskinen med dess starttub mot deponeringshålets mynning.

Deponeringsmaskinen förutses utformas på motsvarande sätt som drivenheten på en TBM-maskin. TBM-maskinen har en drivenhet som både kan trycka mot berget och även förflytta hela TBM-maskinen inne i den borrarade tunneln. Enheten kan utveckla tillräcklig kraft för att pressa borrhuvudet med sina kuttrar mot berget så att det krossas. För TBM-maskinen i Äspö var presskraften i storleksordningen 250 ton. För deponeringsmaskinen torde en presskraft på storleksordningen 20–30 ton vara tillräckligt. Detta måste dock utredas vidare. Det är dock möjligt att utföra inplaceringen av deponeringspaketet med utgångspunkt från existerande tekniska lösningar.

Deponeringsmaskinen i sin starttub dockas på motsvarande sätt som strålskyddstuben, se figur 10-5. Starttuben behöver dock ingen strålskyddssluss. När dockningen är utförd och strålskyddsslussen öppnats kan deponeringsmaskinen börja förflytta deponeringspaketet inne i deponeringshålet. Transportfordonet kan köra bort den tomma starttuben så snart som deponeringsmaskinen är helt inne i deponeringshålet, dockningsanslutningarna lossats och försörjningssystemen till deponeringsmaskinen frikopplats. När fordonet med starttuben är borta kan deponeringsmaskinen anslutas på nytt så att den kan påbörja arbetet med att förflytta deponeringspaketet till sin slutliga position inne i deponeringshålet, se figur 10-6.

Tiden för deponering av ett enskilt paket kommer att bero på utrustningens utformning samt hur lång transportsträckan är. Den kraft som krävs beror på friktionen mot deponeringshålets botten. Eventuellt kan någon form av friktionsminskande åtgärder behövas. Deponeringspaketets läge i deponeringshålet kommer att kunna bestämmas genom olika mätsystem och positioneringsutrustningar.



Figur 10-6. Just avslutad deponering.

Ett fel på deponeringsmaskinen ska antingen kunna åtgärdas på plats inne i deponeringshålet eller utanför. I det senare fallet måste den frigöras, transporteras till deponeringshålets mynning, tas ut och åtgärdas på verkstad.

10.2 Program

Målet för detta delprogram är att konstruera och tillverka en deponeringsbehållare som uppfyller ställda krav. Utrustningarna för borrar, injektering, deponering och återtag ska i möjligaste mån synkroniseras så att hanteringen totalt sett blir så effektiv som möjligt.

Aktiviteter

Följande insatser behövs:

- Fastställa vilka krav som ska ställas på deponeringsbehållaren med avseende på exempelvis korrosionsbeständighet, hållfasthet, kostnad etc.
- Utredda vilket material som är lämpligast för deponeringsbehållaren samt vilken utformning den bör ha.
- Synkronisera utformningen av borrarutrustning, injekteringsutrustning och deponeringsutrustning på ett sådant sätt att en optimal totallösning erhålles.
- Genomföra förstudier av ingående utrustningar för omlastning, transport och deponering av deponeringspaketet. Dessa ska vara tillräckligt detaljerade för att kunna utgöra underlag för ett eventuellt beslut om fortsatta utvecklingsinsatser.
- Efter avslutad förstudie och beslut om fortsatt arbete upprätta ett konceptuellt underlag för ingående utrustningar för omlastning, transport och deponering av hela paketet. Underlaget ska vara tillräckligt detaljerat för att beslut om detaljkonstruktion och tillverkning av erforderlig demonstrationsutrustning ska kunna fattas.
- Detaljkonstruera och tillverka de utrustningar som krävs för att demonstrera horisontell deponering.

På samma sätt som deponeringstekniken i ett KBS-3-förvar med vertikal deponering idag visas i Äspölaboratoriet bör även deponeringen i ett KBS-3-förvar med horisontell deponering demonstreras. Detta görs lämpligen i det 50 meter långa deponeringshål som borrar i Äspölaboratoriet, se kapitel 8. Syftet med demonstrationen är att underbygga ett eventuellt beslut om ett byte av referenskoncept. Följande insatser bör göras:

- Prova och verifiera den deponeringsmetod som identifierats i teknikutvecklingsprogrammet.
- Utveckla ett kvalitetssystem för deponeringen.

11 Pluggning av deponeringshål

11.1 Kunskapsläge

Förslutning med en betongplugg kommer att behövas vid deponeringshålets mynning. Det kommer också att behövas tillfälliga avstängningar, tätande pluggar i stål, inne i deponeringshålen under deponeringsskedet om vattenflödet i deponeringshålet blir för stort, om något oförutsett inträffar eller om ett avbrott i deponeringen erfordras.

11.1.1 Pluggar under deponeringen

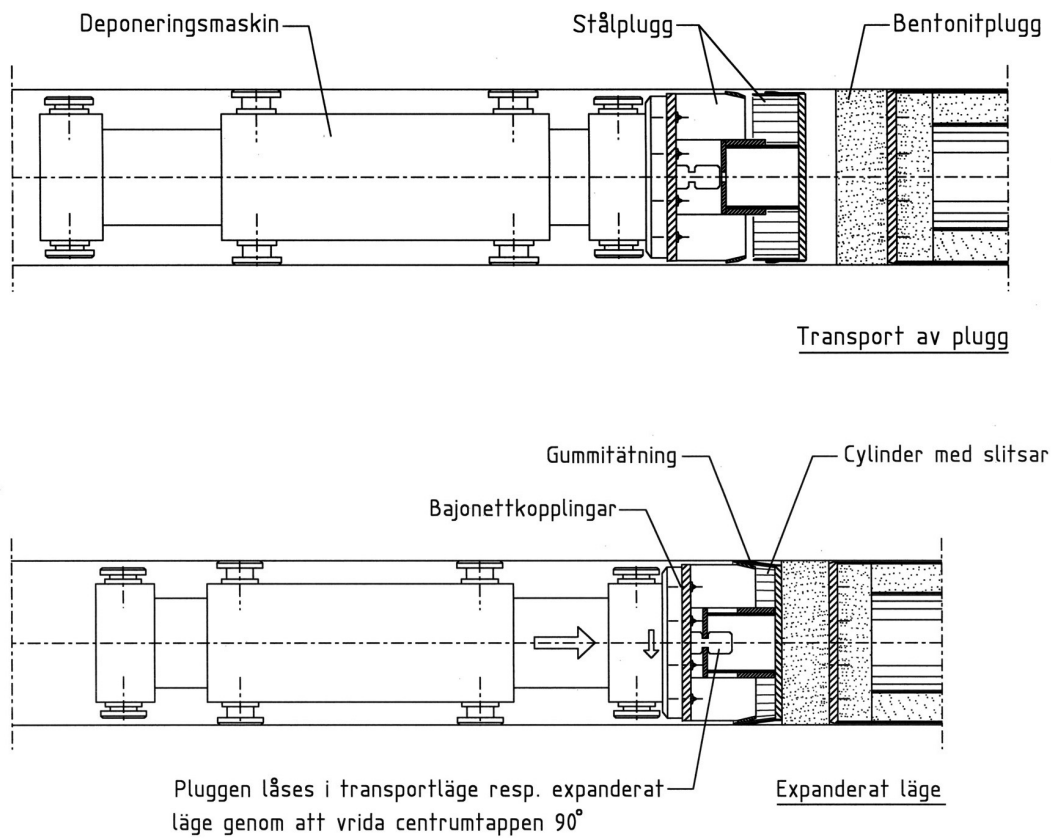
I normalfallet kommer inga pluggar eller tätningar att behövas i deponeringshålet under deponeringen. Om injektering eller fodring av vattenförande zoner under tillredningen av deponeringshålen inte gett tillfredsställande resultat finns en risk för erosion och borttransport av bentonit från distansenheter och deponeringsbehållare under deponeringen. Deponeringshålet kan då behöva sektioneras med stålpluggar för att man ska kunna slutföra deponeringen och inplacera deponeringspaket ända ut till hålets mynning.

Dessa pluggar kan utföras på olika sätt. En okomplicerad konstruktion i stål med en enkel tätningsfunktion mot berget torde vara tillräckligt, se figur 11-1. Kraven på pluggen och tätningens hållfasthet kan beräknas utifrån det vattentryck som kan uppstå under den period som pluggen ska täta. Om pluggen även ska dimensioneras för bentonitens svällningstryck krävs kraftigare konstruktioner och även förankring mot bergväggen.

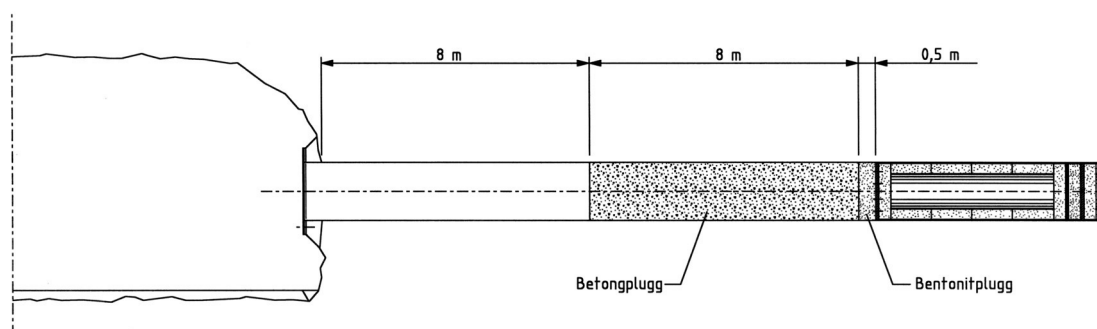
I praktiken är det vattentrycket som bestämmer hur denna typ av pluggar ska utformas och behovet av eventuell infästning i bergväggen. Detta kräver att man kan beräkna hur snabbt spalten mellan väggen och deponeringsbehållaren fylls. Vilken tätningsnivå som kan uppnås utreds i delprogrammet för injektering, se kapitel 9. Antag att inflödet från berget är 0,1 liter per dygn och meter. Spalten mellan deponeringsbehållaren och berget antas vara 3 cm i medeltal, vilket ger en spaltvolym av cirka 160 liter per meter. Detta medför att det tar flera år att fylla upp spaltvolymen kring en deponeringsbehållare. Under tiden byggs trycket upp till några hundra kPa. Detta tryck kan tas upp av en enkel konstruktion, men när spalten är vattenfylld ökar trycket snabbt till höga värden. Enkla pluggar är därför sannolikt tillräckliga för de flesta och oplanerade uppehåll som kan förekomma i deponeringen. Stålpluggen avlägsnas från deponeringshålet före återstart av deponeringen.

11.1.2 Pluggar efter avslutad deponering

När alla deponeringspaket är på plats i ett deponeringshål måste hålet stängas av mot transporttunneln med hjälp av en betongplugg. En sådan plugg ska kunna fungera under flera decennier. Den ska vara tillräckligt mekaniskt stabil för att kunna stå emot det hydrostatiska trycket och svälltrycket från bentoniten. Totaltrycket kan härvid preliminärt uppgå till 10–15 MPa. Pluggarna måste också vara kemiskt beständiga under denna tid. Konstruktionsprincipen kan vara densamma som för vertikal deponering /36/ och provas för närvarande i full skala i projekten ”Backfill and PlugTest” och i ”Prototypförvaret” i Äspölaboratoriet.



Figur 11-1. Preliminär utformning av en stålplugg för avtätning vid avbrott i deponering.



Figur 11-2. Preliminär utformning av en betongplugg för driftförslutning av deponeringshål.

Betongpluggen kan även utföras som en icke armerad friktionsplugg för att undvika behovet av en kraftupptagande slits i hålväggen. Denna typ av plugg har bland annat uppförts för FEBEX-projektet. En preliminär utformning av en friktionsplugg framgår av figur 11-2.

11.2 Program

Detta program avser pluggar för driftförslutning av deponeringshålen mot transporttunneln samt pluggar för sektionering av ett deponeringshål om vattenflödet i deponeringshålet riskerar att transportera bort bentonitmaterial.

Detta program avser inte pluggar som eventuellt kan krävas i transporttunnlar, ramper och schakt i samband med återfyllning och förslutning av undermarksanläggningen. Utvecklingsbehovet för dessa pluggar är detsamma som för referensmetoden och hanteras i andra program.

Aktiviteter

Följande insatser behöver göras:

- Sammanställning av tidigare erfarenheter och kunskapsläge från byggen av pluggar. Detta gäller såväl projekt som genomförs i SKB:s regi som externa projekt.
- Utredning beträffande alternativa konstruktioner av plugg för driftförslutning av deponeringshålen. Exempel på detta kan vara en lång, eventuell oarmerad, friktionsplugg kontra en kort armerad plugg som kräver en slits i tunnelvägg. Gjutningen av pluggen kan ske med vanlig betong, självkompakterande betong eller med expanderande betong för att eliminera eller minska risken för sprickor i betongen och mellan bergväggen och betongen.
- Utredning av utförandet av slitsen i en tunnel med deponeringshållets diameter med val av teknik och utrustning för att kunna göra detta på ett rationellt sätt i det fall en armerad betongplugg väljes.
- Utredning beträffande utformning av stålplugg för sektionering av deponeringshålet för att förhindra vattenflöde längs deponeringshålet under pågående deponering.
- Framtagning av skisser och senare också förslagshandlingar för tillverkning av stålpluggar.
- Tillverka pluggar av stål för att kunna demonstrera funktionen i full skala i KBS-3-tunneln för horisontell deponering i Äspölaboratoriet.

12 Återtag

Med återtag menas i denna rapport alla de moment som krävs för att frilägga kapseln och förflytta den från sin deponeringsposition till en strålskyddad miljö utanför deponeringshålet. Vid diskussioner om återtag från ett förvar med referensutformningen förekommer också ofta även begreppet reversering. Med reversering menas normalt att ett arbetsmoment ska kunna avbrytas och återgång ske till det tidigare läget. En kapsel som precis placerats i sin position i deponeringshålet ska kunna återtagas med samma utrustning som svarade för inplaceringen. I dessa situationer har bentoniten ännu inte börja svälla.

I ett KBS-3-förvar med horisontell deponering blir situationen något annorlunda. Deponeringsbehållaren antas vara intakt under en ganska lång tid men utsvällning av bentonit i distansenheterna och det perforerade deponeringsbehållaren medför att vissa insatser för friläggning kan krävas. Metoden att slamma upp bentoniten med en saltlösning bedöms som möjlig även vid horisontell deponering. Återtag i en situation så långt in i framtiden att deponeringsbehållaren rostas sönder och buffertmaterialet svällt diskuteras inte i denna rapport. Återtag är även då möjligt, men kräver mycket större arbetsinsats och medför högre kostnader

Utbyggnaden av djupförvaret sker stegvis. Enligt SKB:s planer kommer 200–400 kapslar med använt kärnbränsle att deponeras under den inledande driftfasen. Parallellt sker en utvärdering av förvarsmetoden. Denna kommer bland annat att fokusera på hanteringsfrågor och andra praktiska aspekter.

Om utvärderingen visar att förhållandena i förvaret utvecklas som förväntat övergår den inledande driften i reguljär drift. Den långsiktiga säkerheten kommer också att beaktas genom att de krav som ställts på deponeringsprocessen kontrolleras. Om man vid denna utvärdering eller vid senare tillfällen finner det nödvändigt att ta tillbaka de deponerade kapslarna från förvaret, måste teknik och metoder för detta, samt en anläggning för mellanlagring av bränslet finnas tillgängliga. SKI har tidigare framfört dessa synpunkter vid sin granskning av FUD 98 /37/. För att ett återtag ska kunna genomföras krävs tillstånd från SKI.

De återtagna kapslarna ska föras till någon slags mellanlager. Om systemet för hantering av använt kärnbränsle fortfarande är i drift vid detta tillfälle, är det rimligt att ett sådant mellanlager förläggs i anslutning till CLAB och inkapslingsanläggningen. I annat fall måste en anläggning för kärnteknisk verksamhet upprättas på lämplig plats.

12.1 Kunskapsläge

Vid återtag av kapslar skiljer SKB mellan systematiskt återtag och slumpmässigt återtag. Med systematiskt återtag menas att ett större antal kapslar, som deponerats sammanhängande, tas tillbaka. Slumpmässigt återtag innebär att ett fåtal kapslar, som är deponerade utspridda i djupförvarssystemet, tas tillbaka.

I denna rapport utgår fallet med slumpmässigt återtag. Anledningen till detta är att SKB bedömer att ett myndighetsbeslut om återtag kommer att omfatta hela det första deponeringssteget eller delar av det. Sannolikheten för att den reguljära driften alls kommer igång är i en sådan situation mycket liten. Att i detta sammanhang föra ett resonemang om hur ett slumpmässigt återtag ska gå till vid reguljär drift vore att gå för långt.

Dessutom finns det säkerhetsmässiga skäl för att inte förorda ett slumpmässigt återtag. Att ta tillbaka en kapsel från en slumpmässigt vald position innebära att man måste gå in i deponeringshålet från sidan. Detta kommer att försämra säkerheten i förvaret, eftersom man på detta sätt skapar nya potentiella flödesvägar.

12.1.1 Teknik för reversering

Hur återtaget ska genomföras beror på när i tiden det sker. Att ta tillbaka kapslarna direkt efter deponeringen, innan vattenflödet i deponeringshålet fått distansenheterna av bentonit att svälla, är relativt enkelt. Förenklat innebär förfarandet att deponeringsprocessen körs i omvänd ordning. Deponeringsutrustningen måste konstrueras så att den kan ta ett förnyat grepp om deponeringspaketet och distansenheten eller att andra, för ändamålet skräddarsydda komponenter, kopplas in. Utformningen av deponeringsutrustningen diskuteras i kapitel 10.

Om distansenheten har börjat svälla blir återtaget mer komplicerat. Då måste bentonitleran tas bort och deponeringsbehållaren friläggs. Tidsrymden inom vilken vattenmättnad nås styrs av vattentillgången i deponeringshålet. Generellt kan man säga att ju längre tid som gått sedan deponeringstillfället, desto större blir svårighetsgraden, arbetsinsatsen och kostnaderna.

12.1.2 Teknik för friläggning

Under de senaste åren har ett antal metoder för att avlägsna bentonit vid deponering i ett förvar studerats /38/. Både vertikal och horisontell deponering har undersökts. Deponeringen i det horisontella fallet antogs i studierna inte ha skett i form av paket utan i konventionell form med endast buffert runt kapseln. Någon deponeringsbehållare av stål fanns således inte med i beräkningen.

Oavsett om friläggning sker av horisontellt eller vertikalt deponerade kapslar krävs att det finns tillräckligt utrymme i deponeringshål respektive i utanförliggande transporttunnel. Både själva friläggningsutrustningen och den tillhörande processutrustningen måste få plats.

De undersökta metoderna kan delas in i fyra huvudgrupper:

- Mekaniska.
- Hydrodynamiska.
- Termiska.
- Elektrotekniska.

Mekaniska metoder

De mekaniska teknikerna avser fullortsborrning, fräsning, kärnborrning eller slitsborrning med hammarborrtröstning. Bentoniten förväntas kunna bearbetas relativt lätt, men de mekaniska teknikerna kräver verktyg som är beständiga mot såväl nötning som hög temperatur. Att kyla genom att spola vatten på verktygens utsida bedömdes inte kunna tillämpas på grund av bentonitens tendens att bilda gel. En eventuell kylning med vatten måste därför ske i slutna system.

De mekaniska metoderna karakteriserades av risk för kapselskada, hög grad av komplexitet och höga krav på energi/effekt. Det borttagna materialet är fast och kan inte bortföras med hjälp av spolning. Bortforslingen bedöms vara enklast vid fullortsborrning och svårast vid kärnborrning. Fullortsborrning kan emellertid endast utnyttjas för att frilägga kapselns ändyta, medan de övriga metoderna kan användas för att frilägga såväl ändyta som mantelyta.

Hydrodynamiska metoder

De hydrodynamiska teknikerna avser dels de högtryckshydrodynamiska, där man skiljer mellan spoltryck på högre än respektive lägre än 100 bar, dels den lågtrycksdynamiska (spoltryck mindre än 10 bar). Vid tryck över 100 bar skär en tunn vattenstråle, med en diameter av någon millimeter, genom materialet. Eventuellt tillsätts sand i strålen. Vid tryck under 100 bar spolas i stället med en kraftig stråle med en diameter på någon centimeter. Vattnet innehåller salt i samtliga fall. Saltet leder till att bentoniten bildar en suspension, som kan pumpas bort från deponeringshålet. Bentonitslammet kan sedan avvattnas i en filterpress eller i en centrifug.

En principlösning för friläggning av vertikalt och horisontellt deponerade kapslar visas i figur 12-1.

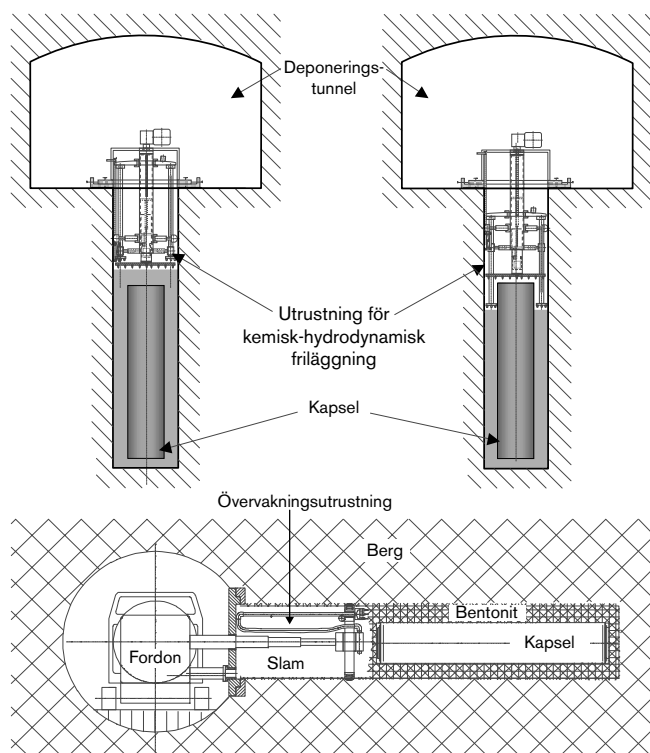
Den lågtryckshydrodynamiska metoden är SKB:s referensmetod för friläggning av vertikalt deponerade kapslar.

Den hydrodynamiska metoden kommer att demonstreras vid Äspölaboratoriet. SKB kommer där under realistiska förhållanden att utveckla och prova tekniken för att frilägga en kapsel från vattenmättad och uppsvälld bentonit samt demonstrera hur en frilagd kapsel kan lyftas ur deponeringshålet och återföras till en strålskärm.

Termiska metoder

Bedömningen av termiska tekniker baserade sig på såväl teoretiska beräkningar som experiment med vattenmättad bentonit. Beräkningarna omfattar värmeledning, samt volymsförändringar till följd av ändrad temperatur och med dessa sammanhängande förändringar i volym och tryck. Bedömningarna baserar sig på antagandet att eventuella spalter uppstår mellan kapsel och bentonit och inte inuti bentoniten samt avser följande fyra typfall:

- Endast den uppvärmning som sker till följd av det radioaktiva sönderfallet i bränslet samt den kylning som erhålls genom närvaron av det omgivande berget.
- Extern tillförsel av värme till bentonitbufferten så att temperaturen sänks med 50 °C.



Figur 12-1. Friläggning av vertikalt och horisontellt deponerade kapslar.

- Extern kylning av bentonitbufferten så att temperaturen sänks med 50 °C.
- Extern kylning av kapseln så att dess temperatur sänks med 50 °C.

Termiska metoder är tillämpliga endast för friläggning av kapselns mantelyta. De är komplicerade och kräver också hög energi/effekt. Någon biprodukt genereras emellertid inte. Friläggning av kapseln erhålls endast i samband med kylning och i dessa fall finns även en viss risk för kapselskada.

Elektriska tekniker

De elektriska tekniker som studerats avser likström och högfrekvent växelström. Applikeringen av likström visade sig ha ringa inverkan på bentoniten, men gav upphov till en besvärande hög avgivning av knallgas. Inga särskilda fördelar med denna metod kunde identifieras. Det gick emellertid att fastställa att tekniken skulle vara mycket komplex och innebära ett stort behov av energi/effekt.

12.2 Program

Målet för programmet för återtag är att redovisa de tekniska förutsättningarna för att återta kapslar från ett KBS-3-förvar med horisontell deponering samt att hitta tekniska lösningar som medger återtag av deponerade kapslar med rimliga insatser och kostnader samt utan att skada den deponerade kapseln.

Aktiviteter

För att identifiera de arbetsinsatser som leder fram till dokumentation av återtagsprocessen behövs följande insatser:

- Förstudie för att undersöka möjligheten att konvertera den tekniska lösningen för friläggning vid deponering enligt referensmetoden (KBS-3-förvar med vertikal deponering) eller alternativa metoder.
- Identifiera hur och i vilken ordning återtagningens övriga arbetsmoment ska utföras och vilka tekniska lösningar dessa kräver. Här avses att greppa och förflytta deponeringspaketet dels ur vilopositionen, dels ur deponeringshålet till strålskyddad miljö.

Demonstration

Skillnaden mellan återtag vid horisontell och vertikal deponering är stor. På sikt finns det anledning att demonstrera hela återtagningen i ett särskilt försök. I så fall används det horisontella deponeringshål som kommer att borraras i Äspölaboratoriet om horisontell deponering ska demonstreras. Målet för detta demonstrationsprogram är att ta fram prototyper av, prova, verifiera och utveckla den utrustning som tagits fram i teknikutvecklingsprogrammet.

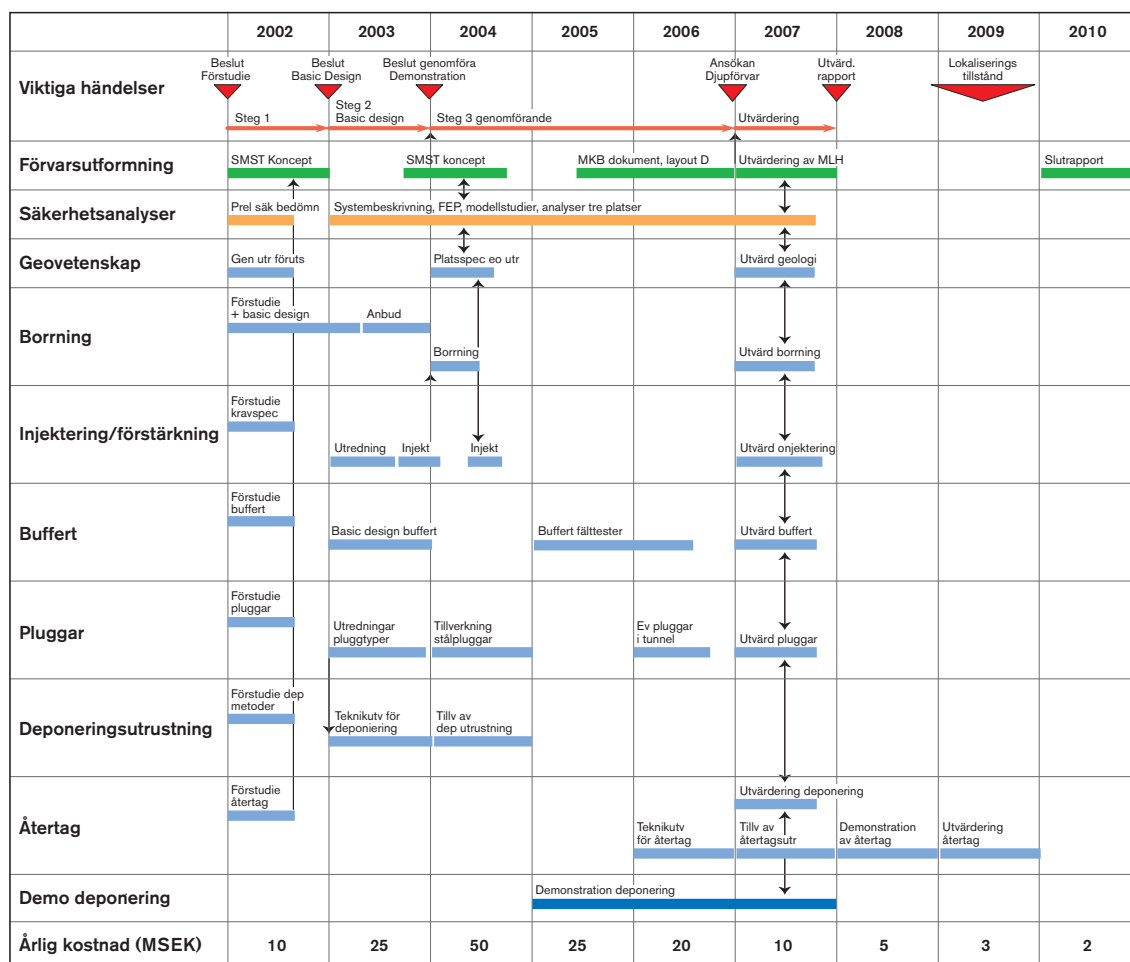
Återtagsförsök för en vertikalt deponerad kapsel kan tjäna som modell för vad försöket ska omfatta. Således bör såväl friläggning från vattenmättad bentonit, som att greppa och förflytta kapseln från viloläget ur deponeringshålet demonstreras i försöket.

13 Resurser

Utifrån de beskrivningar som finns i kapitel 4–12 har en tidsplan utarbetats för hela programmet för forskning, utveckling och demonstration, se figur 13-1. Tidsplanen har i möjligaste mån korrelerats till SKB:s referenstidsplan för platsundersökningar och byggandet av djupförvaret och inkapslingsanläggningen. Genomförandet är således helt beroende av om tidsplanen för platsundersökningarna kan hållas.

Totalkostnaden för genomförandet av programmet för horisontell deponering uppgår till 150 MSEK. Den årliga kostnaden framgår av figur 13-1.

Redan idag kan konstateras att resurserna är begränsade inom delområdena säkerhetsanalys och buffertfrågor. Att ta fram underlag till en första säkerhetsanalys för horisontell deponering kan grovt beräknas ta fem år. Insatserna när det gäller modellering av buffertens utveckling och den integrerade THM-modelleringen styr tidsåtgången. Om alla resurser när det gäller buffertfrågor prioriteras till detta projekt skulle tidsåtgången kunna förkortas till omkring tre år. Detta är emellertid orealistiskt med tanke på SKB:s övriga verksamhet.



Figur 13-1. Översiktlig tidsplan för ett program för forskning, utveckling och demonstration för KBS-3-förvar med horisontell deponering.

Programmet för säkerhetsanalys har följande hållpunkter:

- En inledande säkerhetsbedömning görs under förstudiefasen (år 2002) för att bedöma om utformningen har förutsättningar att klara säkerhetskraven.
- Framtagandet av FEP-databasen och processrapporten påbörjas år 2003 och beräknas pågå i tre år. Kontinuerliga uppdateringar sker i takt med att resultat erhålls från experiment och modellstudier.
- Modellstudier påbörjas år 2004 och beräknas pågå i två år.
- En fullständig säkerhetsanalys genomförs under år 2006. Analysen bygger på generiska data.
- Fullständiga säkerhetsanalyser som baserar sig på data från platsundersökningarna genomförs under år 2007.

Det är dock viktigt att observera att SKB idag inte har personella resurser för att genomföra ovanstående analyser samtidigt med de som planeras för referensutformningen.

En annan tidskritisk aktivitet är de demonstrationsförsök som ska genomföras i Äspö-laboratoriet. Detta måste anpassas i tiden så att de inte stör redan pågående verksamhet. Borrningen av demonstrationsborrhålet måste föregås av utveckling av borrhålsutrustningen. Oberoende av vilket alternativ som väljs kommer tidsåtgången för att förbereda och genomföra borrningen att uppgå till mellan ett och tre år. Clustertekniken bedöms kräva den kortaste tiden för anpassning till horisontell deponering. Tidsperioden måste dessutom räknas från den tidpunkt då den slutliga diametern på hålet har bestämts.

Om horisontell deponering väljes som nytt referensalternativ kommer frågan om behov och omfattning av eventuella demonstrationer av möjligheten till återtag att prövas på nytt. Återtag kommer dock att vara tekniskt möjligt på samma sätt som för dagens referensmetod.

14 Slutsatser

KBS-3-metoden med horisontell deponering bedöms i dagsläget som ett genomförbart deponeringsalternativ och innebär att vissa problem som föreligger med dagens referensalternativ försvinner. Ett exempel på detta är återfyllningen av deponeringstunnlarna. Horisontell deponering medför dessutom att behovet att spränga ut totalt 30 till 40 km långa deponeringstunnlar med en tvärsnittsarea på cirka 30 m² utgår. De motsvarar ungefär hälften av den utsprängda bergvolymen för referensalternativet med vertikal deponering. Detta medför att miljöstörningen minskar och har påtagliga ekonomiska vinster. Många av frågorna kring geologi och långsiktig säkerhet för horisontell deponering är till stor del av generisk natur, varför arbetet med referensalternativet kommer att kunna utnyttjas i stor utsträckning.

Nya typer av frågeställningar kommer dock att kräva speciella insatser. Hantering och inplacering av det cirka 50 ton tunga deponeringspaketet kommer att kräva prov i full skala för att visa att inplacering och reversering av deponeringsprocessen är tekniskt genomförbart.

Horisontell deponering kommer att kräva en stark fokusering på teknikutvecklingen. Borrning av långa horisontella deponeringshål bedöms dock som full tekniskt möjligt. Tunnlar med dimensioner i samma storlek som deponeringshålen finns borrade i hårda bergarter men inte med de längder som nu diskuteras för horisontell deponering.

Injektering för tätning för att reducera vatteninläckaget i deponeringstunnlarna och eventuella förstärkningsåtgärder bedöms möjliga, men den lilla tunneldiametern och längden försvårar denna typ av arbete.

Ett KBS-3-förvar med horisontell deponering är dessutom inte enbart ett tekniskt problem utan lika mycket ett kommunikationsproblem. KBS-3 med vertikal deponering har med tiden blivit den enda symbolen för hur djupförvaret ska se ut både internt inom SKB och externt mot allmänhet och myndigheter. Att skapa en förutsättningslös diskussion och kanske till och med ändra denna bild är ett kvalificerat informationsproblem.

Den knappa tiden för att lyfta kunskapsnivån för horisontell deponering är ett stort bekymmer eftersom SKB parallellt måste arbeta med platsundersökning, projektering och säkerhetsanalys på tre platser baserat på referensmetoden för deponering. Detta forskningsprogram måste därför kopplas till SKB:s långsiktiga tids- och resursplanering.

Platsundersökningsskedet och den intensifierade teknikutvecklingen kommer att innebära att det blir kompetensbrist inom flera områden, till exempel säkerhetsanalys och buffertfrågor, där referensalternativet måste ha första prioritet. Det är dessutom inte rimligt att SKB allokerar alla sina resurser till horisontell deponering.

Arbetet med vertikal och horisontell deponering kräver att SKB tar ställning i en rad frågor av generisk natur. Hur högt pH och således hur mycket betong vi kan tolerera är en sådan fråga.

En förstudie har startats i samarbete med Posiva beträffande KBS-3-förvar med horisontell deponering, vilket medför att nya resurser och erfarenheter knyts till projektet.

Projektgruppen som har svarat för framtagning av detta forskningsprogram rekommenderar att programmet genomförs enligt detta förslag. Detta innebär att en förstudie skulle inledas under 2002. Avrapportering sker hösten 2002 för att besluta om eventuellt även genomföra framtagning av det konceptuella underlaget under 2003. Hösten 2003 planeras avrapportering av arbetet med framtagning av det konceptuella underlaget och eventuellt beslut att genomföra demonstration i full skala.

Referenser

1. **SKBF/KBS, 1983.** Kärnbränslecykelns slutsteg. Använt kärnbränsle – KBS-3. Del I–IV. Svensk Kärnbränsleförsörjning AB.
2. **SKB, 1992.** Projekt alternativstudier för slutförvar (PASS). Slutrapport. Svensk Kärnbränslehantering AB.
3. **SKB, 2001.** Project Jade. Comparison of repository systems. SKB TR-01-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
4. Miljöbalk (1998:808). Prop 1997/98:45, bet JoU 1997/98, rskr 1997/98:278.
5. Lag (1984:3) om kärnteknisk verksamhet. Prop 1983/84:60, bet NU 1983/84:17, rskr 1983/84:135.
6. Strålskyddslag (1988:220). Prop 1987/88:88, bet JoU 1987/88:19, rskr 1987/88:234.
7. Förordning (1984:14) om kärnteknisk verksamhet. Prop 1983/84:60, bet NU 1983/84:17, rskr 1983/84:135.
8. Strålskyddsförordning (1988:293). Prop 1987/88:88, bet JoU 1987/88:19, rskr 1987/88:234.
9. **SSI, 1998.** Statens strålskyddsinstitutets föreskrifter om skydd av människors hälsa och miljö vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall. SSI FS 1998:1, Statens strålskyddsinstitut.
10. **SKI, in prep.** Statens kärnkraftinspektions föreskrifter om säkerhet vid slutförvaring av kärnavfall. Statens kärnkraftinspektion.
11. **IAEA, 1997.** Measures to Strengthen International Co-operation in Nuclear, Radiation and Waste Safety (a) Joint Convention on the Safety of Spent Nuclear Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. GOV/INF/821-GC(41)/INF/12, International Atomic Energy Agency.
12. **Birgersson L, Pers K, Wiborgh M, 2001.** Project Jade. Long-term and safety comparison of repository systems. SKB TR-01-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
13. **Sandstedt H, Munier R, 2001.** Projekt Jade. Jämförelse av teknik. SKB R-01-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.
14. **Ageskog L, 2001.** Projekt Jade. Jämförande av kostnadsanalys mellan olika deponeringsmetoder. SKB R-01-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.
15. **Kalbantner P, 2001.** Projekt Jade. Process- och maskinbeskrivning av utrustning för deponering av kapslar i medellånga deponeringshål. SKB R-01-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.
16. **Autio J, Saunio T, Tolppanen P, Raiko H, Vieno T, Salo J-P, 1996.** Assessment of alternative disposal concepts. Posiva 96-12, Posiva Oy.

17. **Vieno T, Nordman H, 1999.** Safety assessment of spent fuel disposal in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara – TILA-99. Posiva 99-07, Posiva Oy.
18. **Enresa, 1999.** Plan de investigación y desarrollo tecnologico para la gestion de residuos radioactivos 1999–2003. Publicación técnica 08/99, Empresa Nacional de Residuos Radioactivos.
19. **Enresa, 2000.** FEBEX project. Full scale barriers experiment for a deep geological repository for high level radioactive waste in crystalline host rock. Final report. Publicación técnica 1/2000, Empresa Nacional de Residuos Radioactivos.
20. **Nagra, 1985.** Project Gewähr. Nuclear Waste Management in Switzerland. Feasibility Studies and Safety Analyses. NGB 85-09 Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle.
21. **Nold A, 2000.** The Swiss HLW/ILW Repository in Opalinus Clay. Programme, layout and Emplacement of Spent Fuel Canisters. Proceedings from Distec 2000 – International Conference on Radioactive Waste Disposal, September 4–6, 2000, Berlin.
22. **SKB, 2001.** FUD-program 2001. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall. Svensk Kärnbränslehantering AB.
23. **SKB, 1999.** Djupförvar för använt kärnbränsle. SR-97 Säkerheten efter förslutning. Huvudrapport, del I och II. Svensk Kärnbränslehantering AB.
24. **SKI/SSI, 2000.** SKI:s och SSI:s gemensamma granskning av SKB:s Säkerhetsrapport SR 97, Granskningsrapport. SKI rapport 00:39, Statens kärnkraftinspektion. SSI-rapport 2000:17, Statens strålskyddsinstitut.
25. **SKI, 2000.** Internationell fristående expertgranskning av Säkerhetsrapport 97: Säkerhet efter förslutning av ett djupförvar för använt kärnbränsle i Sverige. SKI rapport 00:45, Statens kärnkraftinspektion.
26. **SKB, 1999.** SR-97 – Processer i förvarets utveckling. Underlagsrapport till SR 97, Svensk Kärnbränslehantering AB.
27. **Pusch R, 2000.** On the effect of hot water vapor on MX-80 clay. SKB TR-00-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
28. **Munier R, Follin S, Rhén I, Gustafsson G, Pusch R, 2001.** Projekt Jade. Geovetenskapliga studier. SKB R-01-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
29. **Gustafson G, Rosén L, 1994.** Suitable nearfield design – Stage 1. Application of a Markov–Bayes geostatistical model. SKB HRL Progress Report 25-94-33, Svensk Kärnbränslehantering AB.
30. **Gustafson G, Rosén L, 1994.** Suitable nearfield design – Stage 2. Provisional positioning index (PPI) predictions with respect to lithology, hydraulic conductivity and rock designation index. SKB HRL Progress Report 25-95-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
31. **Munier R, 2001.** Djupförvarsteknik. Beräkning av nyttjandegrad för ett djupförvar. Förslag till metod baserad på stokastisk simulering. SKB TD-01-45, Svensk Kärnbränslehantering AB.

32. **Wallis S, 1997.** Knoxville smallbore. World tunnelling and subsurface excavation, Vol mars, pp 53–57.
33. **Börgesson L, Pusch R, Fredriksson A, Hökmark H, Karnland O, Sandén T, 1991.** Final report of the rock sealing project – Sealing of the near-field rock around deposition holes by use of bentonite grouts. SKB Stripa Project Technical Report 91-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.
34. **Lindblom U, Dahlström L-O, 1999.** Äspölaboratoriet. Förinjekteringens stabiliserande och tätande verkan. Etapp 1 – Kunskapsläget. SKB Tekniskt Dokument TD-99-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
35. **Bodén A (red), 2001.** Översikt av resultat från SKB:s FoU inom injekteringsteknik för bergtätning åren 1996–2000. SKB R-01-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.
36. **Hökmark H, 1997.** Design av temporär plugg i ZEDEX-orten. SKB Project Report D-97-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
37. **SKI, 2001.** SKI:s utvärdering av SKB:s FUD-program 98. Gransknings-PM. SKI rapport 99:16, Statens Kärnkraftinspektion AB.
38. **Kalbantner P, Sjöblom R, 2000.** Techniques for freeing deposited canisters. Final report. SKB TR-00-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.