



UNDERLAGSRAPPORT TILL
FoU-PROGRAM 86

Kärnkraftavfallets behandling och slutförvaring.

**Internationell och
utländsk verksamhet**

September 1986

Kärnkraftavfallets behandling och slutförvaring.

**Internationell och
utländsk verksamhet**

September 1986

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	Sida
SAMMANFATTNING	5
1 INLEDNING	7
1.1 Bakgrund	
1.2 Rapportens syfte	
2 ÖVERSIKT AV INTERNATIONELLA OCH UTLÄNDSKA KÄRNAVFALLSPROGRAM	9
2.1 Översikt	
2.2 Nationella program	
2.2.1 USA	
2.2.2 Kanada	
2.2.3 Frankrike	
2.2.4 Västtyskland	
2.2.5 Storbritannien	
2.2.6 EG-länderna	
2.2.7 Schweiz	
2.2.8 Finland	
2.2.9 Japan	
2.2.10 Övriga länder	
2.3 Internationella program	
3 PÅGÅENDE OCH PLANERAD UTLÄNDSK FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS-VERKSAMHET	33
3.1 Översikt	
3.2 Geovetenskap och platsundersökningar	
3.3 Underjordiska laboratorier	
3.4 Kemi	
3.4.1 Grundvattenkemi	
3.4.2 Radionuklidkemi	
3.4.3 Radionuklidtransport	
3.4.4 In-situ-försök	
3.4.5 Naturliga analogier	
3.4.6 Betong	
3.4.7 Övrigt	
3.5 Avfallsformer	
3.6 Kapsel - material och utformning	
3.7 Buffert och återfyllnad	
3.8 Utformning av förvar	
3.9 Biosfärsstudier	
3.9.1 Allmänt	
3.10 Säkerhetsanalys	
3.10.1 Allmänt	
3.10.2 Nationella och internationella insatser	
3.10.3 Information utifrån	
4 INTERNATIONELLT SAMARBETE	51
4.1 Översikt	
4.2 Internationella organ	
4.3 Bilateralt samarbete	
REFERENSER	53

SAMMANFATTNING

Utvecklingen inom kärnavfallsområdet sker i stor utsträckning i internationell samverkan. De flesta länder med kärnkraftsprogram har planer för hur avfallet skall tas om hand, och har påbörjat den forskning och utveckling som erfordras.

SKB har genom formella avtal och informella kontakter ett omfattande samarbete och informationsutbyte med länder som har likartade principlösningar, geologiska förutsättningar eller tidplaner. Speciellt kan följande länder nämnas:

- Canada.
- Finland.
- Frankrike.
- Japan.
- Schweiz.
- Storbritannien.
- USA.

SKB har även ett informationsutbytesavtal med Euratom. Inom IAEA och OECD/NEA deltar SKB i ett flertal arbetsgrupper inom kärnavfallsområdet.

Några områden där SKB aktivt deltar i internationellt FoU-arbete är:

- Lakning av bränsle.
Grundforskning för att beskriva processer hur olika ämnen kan frigöras från bränslet.
- Korrosion hos kapslingsmaterial.
Insamling av data för att ge underlag för kapseldesign.

- Buffertmaterial.
Egenskaper hos buffertmaterial (ex bentonit) i ett långtidsperspektiv.
- Grundvattenkemi.
Kemisk påverkan på barriärerna i ett långtidsperspektiv.
- Radionuklidkemi och migrationsfenomen.
Modellering av transport- och spridningsförlopp i olika material.
- Geologi.
Metoder vid platsundersökningar.
- Hydrologi.
Mätmetoder för att kartlägga grundvattenrörelser.
- Säkerhetsanalyser.
Utveckling av integrerade datorbaserade system för funktions- och säkerhetsanalys.

Svenska specialister och konsulter arbetar i längre eller kortare perioder för SKBs räkning vid laboratorier eller andra institutioner utomlands. Institutioner i Sverige tar på motsvarande sätt emot utländska forskare inom SKBs forskningsprogram.

STRIPA-projektet med deltagande från Canada, England, Finland, Frankrike, Japan, Spanien, Sverige och USA är ett bra exempel på det intresse för samarbete och samordning av forskning inom kärnavfallsområdet som visas internationellt idag.

1 INLEDNING

1.1 BAKGRUND

I lagen om kärnteknisk verksamhet föreskrivs att kärnkraftföretagen gemensamt skall upprätta ett program för allsidig forsknings- och utvecklingsverksamhet på kärnavfallsområdet. Programmet skall vart tredje år med början september 1986 insändas till kärnbränslenämnden. Det sammanställs av SKB för kraftföretagens räkning. För det allsidiga forskningsprogrammet tar SKB fram följande underlag:

- En genomgång av alternativa koncept och metoder för slutförvaring.
- En genomgång av utländsk verksamhet inom kärnavfallsområdet.

Denna rapport utgör en sammanställning av underlaget om den utländska verksamheten.

1.2 RAPPORTENS SYFTE

Rapporten redovisar kortfattat det forsknings- och utvecklingsarbete som pågår och planeras i andra länder och internationellt. Materialet är sammanställt på grundval av information inhämtad genom:

- Bilateralavtal.
- Övriga internationella kontakter.
- Öppen litteratur.

varför sammanställningen i huvudsak omfattar de västliga industriländerna.

Med anledning av den svenska FoU-verksamhetens inriktning mot direktdeponering av använt kärnbränsle, har sammanställningen fokuserats på forskningen inom detta område.

Utvecklingen inom kärnavfallsområdet sker sedan länge i stor utsträckning i internationell samverkan och växelverkan och syftet med denna rapport är bl a att sätta in de svenska insatserna i detta perspektiv. Den skall också ge underlag till att påvisa områden, inom vilka SKB kan samverka med andra länder eller där andra länder genom sin forskning täcker det informationsbehov som finns för svensk del.

Den direkta nyttan för svensk del av verksamheten i andra länder beror på:

- tekniska och geologiska likheter i fråga om förvarsutformning och förvarsmedium,
- tidplaner för genomförande av FoU, storskaleförsök, demonstrationsprojekt och byggande/drift av förvar.

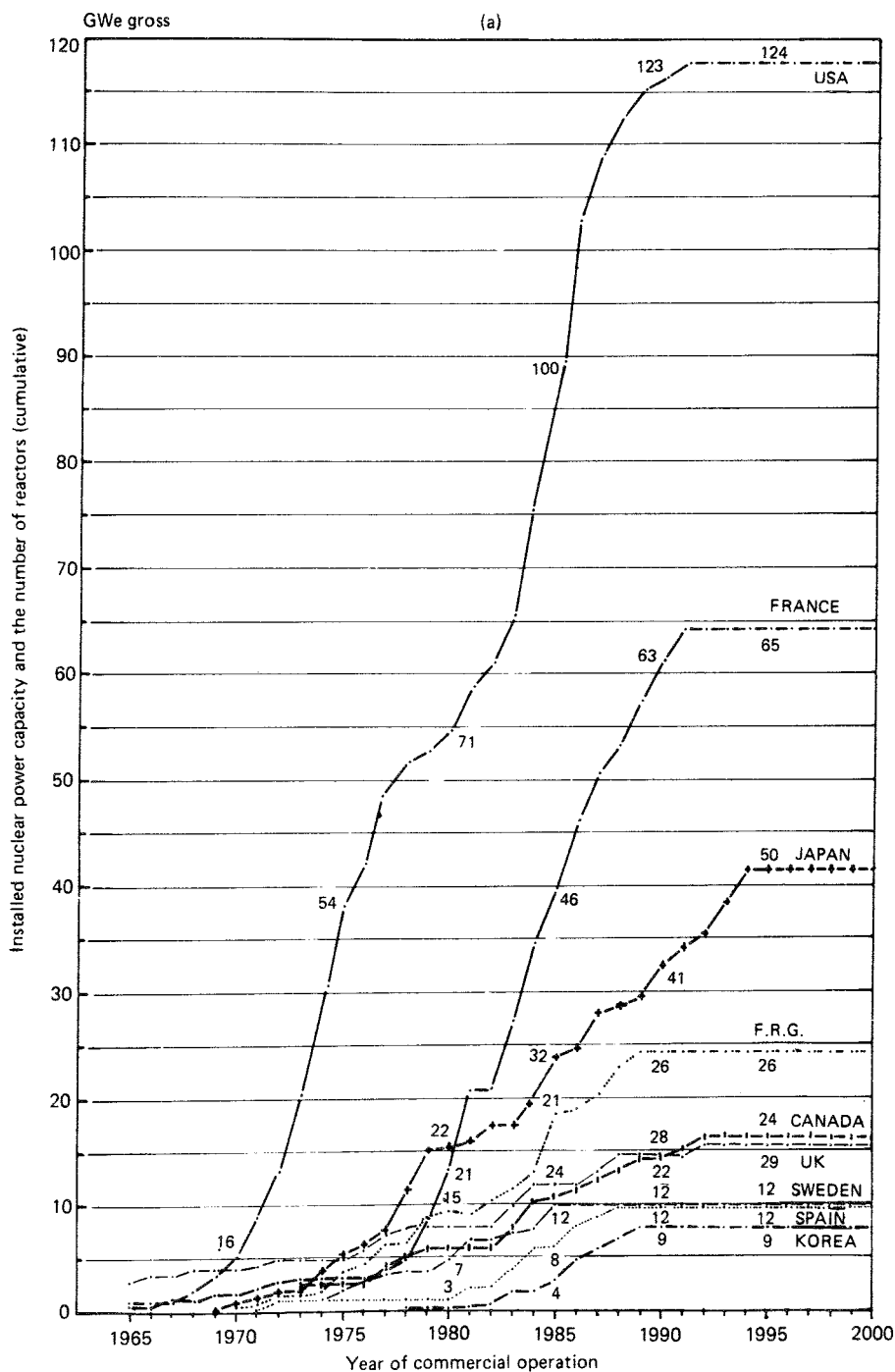
En indirekt nytta av den utländska verksamheten är att den ofta täcker alternativ och varianter som ligger vid sidan av huvudinriktningen i Sverige. En välorganiserad uppföljning av den utländska verksamheten bidrar till möjligheterna att täcka lagens krav på allsidighet.

2 ÖVERSIKT AV INTERNATIONELLA OCH UTLÄNDSKA KÄRNAVFALLSPROGRAM

Detta kapitel innehåller en allmän genomgång av verksamhet och planer i olika länder. Lagstiftning, organisationsformer, ansvarsfördelning, koncept, tidplaner och program beskrivs. Forsknings- och utvecklingsverksamheten behandlas mera i detalj i kapitel 3. Sammanställningar liknande den som görs nedan har gjorts i flera olika sammanhang, varför framställningen här hållits kortfattad. För en fylligare information hänvisas till de referenser som anges i respektive avsnitt.

2.1 ÖVERSIKT

De flesta länder med ett större kärnkraftprogram har de senaste åren utformat planer för hur man tänker ta hand om sitt högaktiva avfall. I samband därmed har man också klarlagt ansvarsbilden och påbörjat den forskning och utveckling som anses krävas.



Figur 2.1.1. Cumulative installed nuclear power capacity and the number of reactors by country.

Hämtad ur: Directory of Nuclear Power Plants in the World 1985, sid 15, Japan Nuclear Energy Information Center Co., Ltd.

2.2 NATIONELLA PROGRAM

2.2.1 USA

Kärnkraftsprogram:

USA har med ca 83 GWe kärnkraft år 1985 det största kärnkraftsprogrammet i världen /2.2.1.1/. Andelen elkraft från kärnenergin är dock endast ca 15%. Baserat på de anläggningar som nu är i drift eller under byggnad kan man uppskatta att kärnkraften kommer att svara för ca 20% av elproduktionen under 1990-talet. Grunddata om det amerikanska kärnkraftsprogrammet framgår av Tabell 2.2.1.1. Kärnkraftens framtid i USA på längre sikt är oviss beroende på en rad tekniska, ekonomiska och sociologiska faktorer.

Tabell 2.2.1.1. Några grunddata om kärnkraftsprogrammet i USA.

Installerad kärnkraft, GWe	Andel av totalel (%)	Antal kraftreaktorer	Accumulerad mängd bränsle (t)
82.6	15	93	11 000

Dagens hantering av kärnavfallet

Huvuddelen av det använda bränsle som hittills uppkommit vid kärnkraftproduktionen i USA lagras i bäsänger vid kärnkraftverken. Totalt rör det sig om ca 11 000 ton bränsle /2.2.1.2/. Endast en mindre mängd bränsle, ca 650 ton, har tidigare upparbetats 1966-1972 vid den nu stängda anläggningen i West Valley, New York State. Det högaktiva avfallet från upparbetningen lagras i flytande form och man bygger system för att solidifiera detta i glas. Anläggningen beräknas tas i drift 1987.

Högaktivt avfall har också producerats inom det militära programmet i USA. Det har i regel lägre aktivitetstänk än avfallet från det civila programmet men det har en sådan värmeutveckling och är så långlivat att det måste slutförvaras på samma sätt som övrigt högaktivt avfall eller bränsle. Militärt högaktivt avfall alstras och lagras vid tre DOE-anläggningar i Savannah River Plant (South Carolina), the Idaho National Engineering Laboratory (Idaho) och vid Hanford (Washington).

Vid Savannah River och Hanford lagras det högaktiva avfallet i vätskeform i underjordiska tankar och vid Idaho har man kalcinerat avfallet till ett pulverliknande material som lagras i tankar under jord. En behandlingsanläggning för det högaktiva avfallet vid Savannah River är under uppförande med beräknad idrifttagning 1989.

Låg- och medelaktivt avfall i betydande mängder (ca $3.2 \cdot 10^6$ m³ i slutet av 1984) har uppkommit inom såväl civila som militära tillämpningar av kärntekniken /2.2.1.3/. Det mesta av detta har, efter eventuell konditionering, deponerats genom marknedgrävning, s.k. shallow ground burial. För närvarande finns tre kommersiella (civila) nedgrävningsplatser i drift i USA: Barnwell i South Carolina, Hanford i State of Washington och Beatty, Nevada. Dessutom finns flera lokala, ej kommersiellt tillgängliga, markdeponeringsanläggningar. För militärt s.k. TRU-avfall

(=långlivat alfa-aktivt) byggs, i en saltformation i södra New Mexico, den s.k. WIPP-anläggningen (Waste Isolation Pilot Plant). WIPP är en experimentanläggning för slutförvaring, som beräknas kunna börja ta emot alfaaktivt avfall 1989.

Lagstiftning på kärnavfallsområdet

Kongressen i USA antog i december 1982 den s.k. Nuclear Waste Policy Act. Den blev lag den 7 januari 1983 i och med att president Reagan undertecknade "Public Law 97425" /2.2.1.4/.

Lagen fastslår att den federala regeringen har ansvaret för slutförvaringen av högaktivt avfall och använt kärnbränsle. Det åligger DOE (Department of Energy) att planera och bygga slutförvaret.

Ett första slutförvar måste enligt lagen kunna tas i drift senast 31 januari 1998. I lagen ges detaljerade anvisningar för ansvarsfördelning, finansiering, reglering och genomförande. Kostnaden skall täckas med en avgift på kärnkraftel.

Deponering av låg- och medelaktivt avfall är ett delstatligt ansvar enligt "Low-level Radioactive Waste Policy Act" från 1980 /2.2.1.5/. Flera delstater kan gå samman för att finna de regionalt bästa lösningarna. Lagen kompletterades i slutet av 1985 genom den s.k. "Low-level Radioactive Waste Amendment Act" från 1985 /2.2.1.6/. Den nya tilläggslagen föreskriver bl.a. en ganska detaljerad tidsplan för delstaternas agerande.

I USA finns detaljerade regler från NRC (Nuclear Regulatory Commission) och EPA (Environmental Protection Agency) för kriterier i samband med slutförvaringen av kärnavfallet /2.2.1.7, 2.2.1.8/. De innefattar bl.a.:

- kvantitativa gränsvärden för ackumulerade utsläpp till miljön (accessible environment) över en 10 000-års period,
- krav på praktiskt taget fullständig inneslutning (substantially complete containment) av avfallet under en period av 300 - 1 000 år och gränsvärden för vilken andel som därefter får frigöras från närzonen,
- krav på att transporttiden för grundvattnet uppgår till minst 1 000 år från den tänkta förvarsplatsen till miljön (accessible environment).

DOE har, i kontakt med NRC, utgivit riktlinjer för platsurvalet /2.2.1.9/. Där anges bl.a. tekniska riktlinjer för nödvändiga (qualifying), gynnsamma (favorable), potentiellt ogynnsamma (potentially adverse) och diskvalificerande förhållanden i fråga om geologi, hydrologi, geokemi etc.

För deponering av lågaktivt avfall gäller NRC:s regler från 16 januari 1983 /2.2.1.10/.

KÄRNAVFALLSPROGRAM

Högaktivt avfall /2.2.1.11, 2.2.1.12/

Den amerikanska avfallsstrategin innebär att använt kärnbränsle och solidifierat högaktivt avfall från upparbetning skall deponeras i förvar i stabila geologiska formationer.

Det är i första hand salt-, basalt- och tuffformationer som varit föremål för det största intresset. Undersökningar pågår dock även i områden med kristallina bergarter, främst i östra delen av landet. Lerskiffer och andra sedimentära bergarter har också undersökts.

Allmänna för- och nackdelar med de tre bergarter, som är aktuella för det första slutförvaret, har av DOE angivits i Tabell 2.2.1.2.

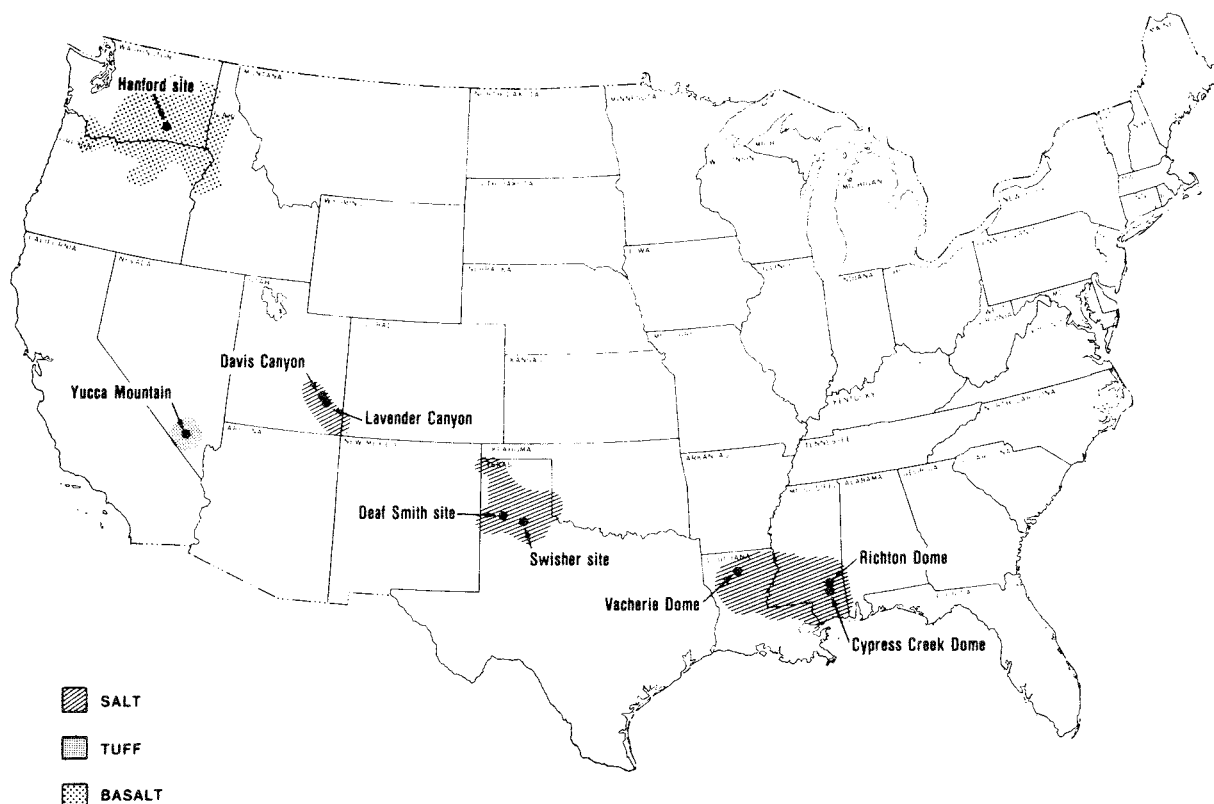
1976 påbörjade DOE undersökningar för val av lämplig förlägningsplats för ett slutförvar. I februari 1983 presenterades en lista på nio platser, se Figur 2.2.1.1/2.2.1.11/. Sju av dessa gäller salt: Deaf Smith och Swisher i saltlager i Texas, Davies Canyon och Lavender Canyon i saltlager i Utah, Richton och Cypress Creek i saltdomer i Mississippi samt Vacherie i saltdom i Louisiana. Hanford i staten Washington är en basaltformation och Yucca Mountain i Nevada består av tuff. Preliminära säkerhetsrapporter har utarbetats för dessa nio potentiella förlägningsplatser, och DOE har rekommenderat att Deaf Smith, Hanford och Yucca Mountain skall bli föremål för mer detaljerade undersökningar inför det slutliga valet av förlägningsplats för det första förvaret. De första provschakten skall börja sänkas under 1986 och en slutlig säkerhetsanalys avlämnas 1990. Presidenten skall avlämna rekommendation i platsvalsfrågan till kongressen i början av 1991, se Figur 2.2.1.2. Ansökan om tillstånd att genomföra projektet på den av kongressen fastlagda platsen, inlämnas till NRC i mitten av 1991. Och om tillstånd erhålles i mitten av 1993 kommer förvaret enligt denna tidplan att kunna börja

tas i drift 1998. Förvarets kapacitet uppgår till 70 000 ton uran (i utbränt bränsle, eller solidifierat högaktivt avfall från upparbetning av motsvarande uranmängd i använt bränsle) och anläggningen skall vid full drift kunna ta emot 3 000 ton uran per år.

Tidplanen för ytterligare ett lika stort slutförvar framgår av Figur 2.2.1.3. Platsvalet för detta förvar skall enligt denna tidplan göras år 1998 och driften startas 2006. För detta andra förvar kan förläggning i kristallina bergarter som gnejs och granit bli aktuell. Figur 2.2.1.4 visar sådana områden inom USA, som efter en översiktlig genomgång bedöms vara intressanta /2.2.1.13, 2.2.1.11/.

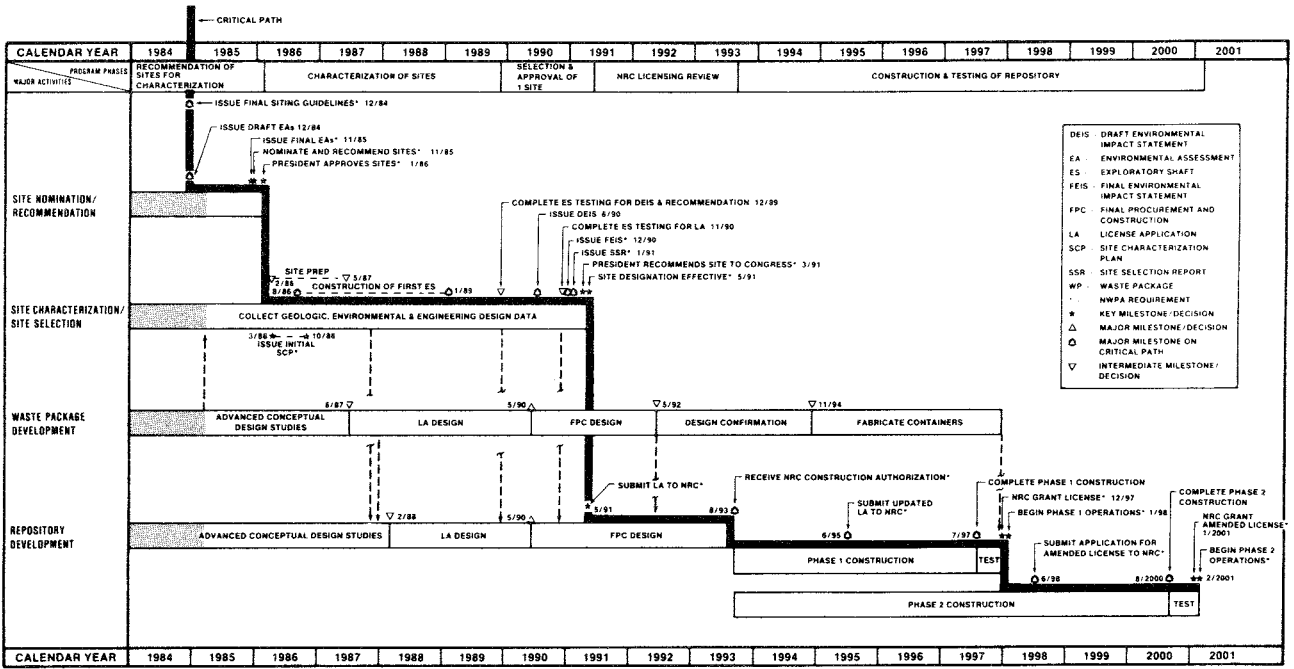
För det fortsatta arbetet har DOE valt ut sammanlagt 12 områden i 7 delstater /2.2.1.14/. Undersökningar (bl a borrhningar och seismiska studier) i de utvalda områdena skall pågå till 1991, då DOE skall rekommendera tre platser (varav en kan vara i kristallin berggrund) för mer detaljerade undersökningar inför platsvalet för det andra slutförvaret 1998.

En schematisk utformning av en slutförvaringsanläggning framgår av Figur 2.2.1.5. Utformningen blir givetvis beroende av de lokala förhållandena på förlägningsplatsen. En omfattande projektstudie har utförts för förläggning av förvaret i basaltlagren vid Hanford och arbeten pågår för de övriga potentiella förlägningsplatserna.



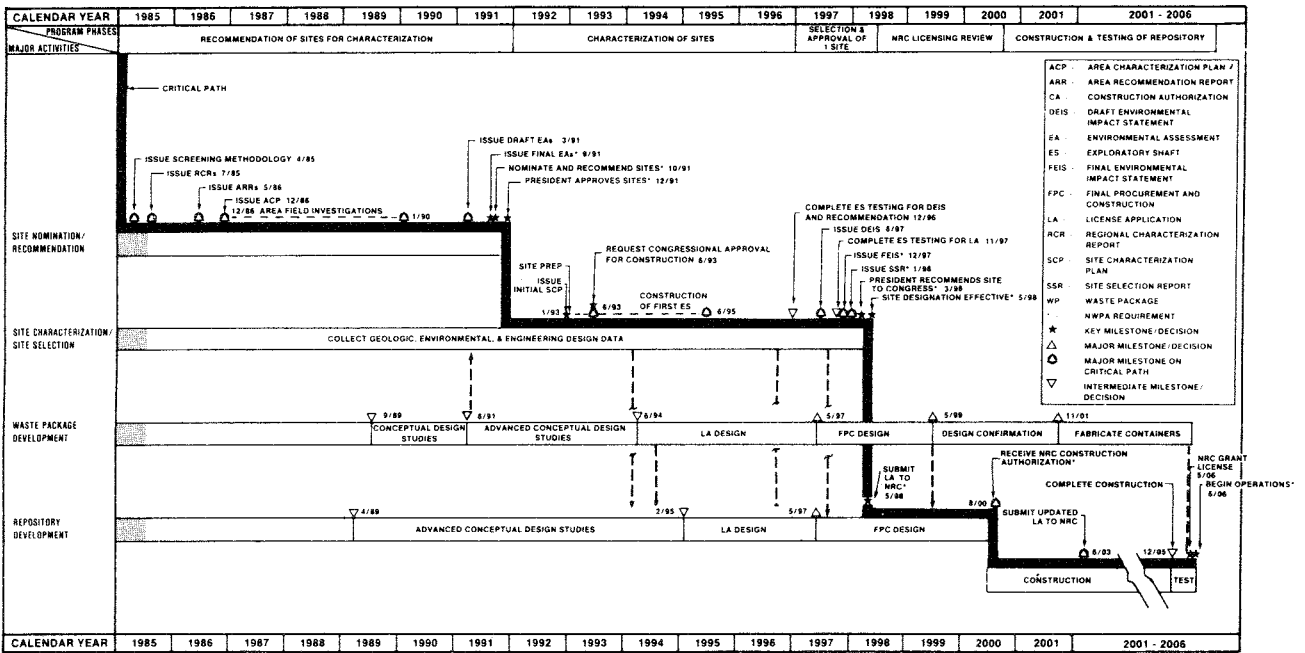
Figur 2.2.1.1. Potentially acceptable sites for the first repository.

Hämtad ur: Mission Plan for the Civilian Radioactive Waste Management Program, Juni 1985 DOE/RW-0085, Volym 1.



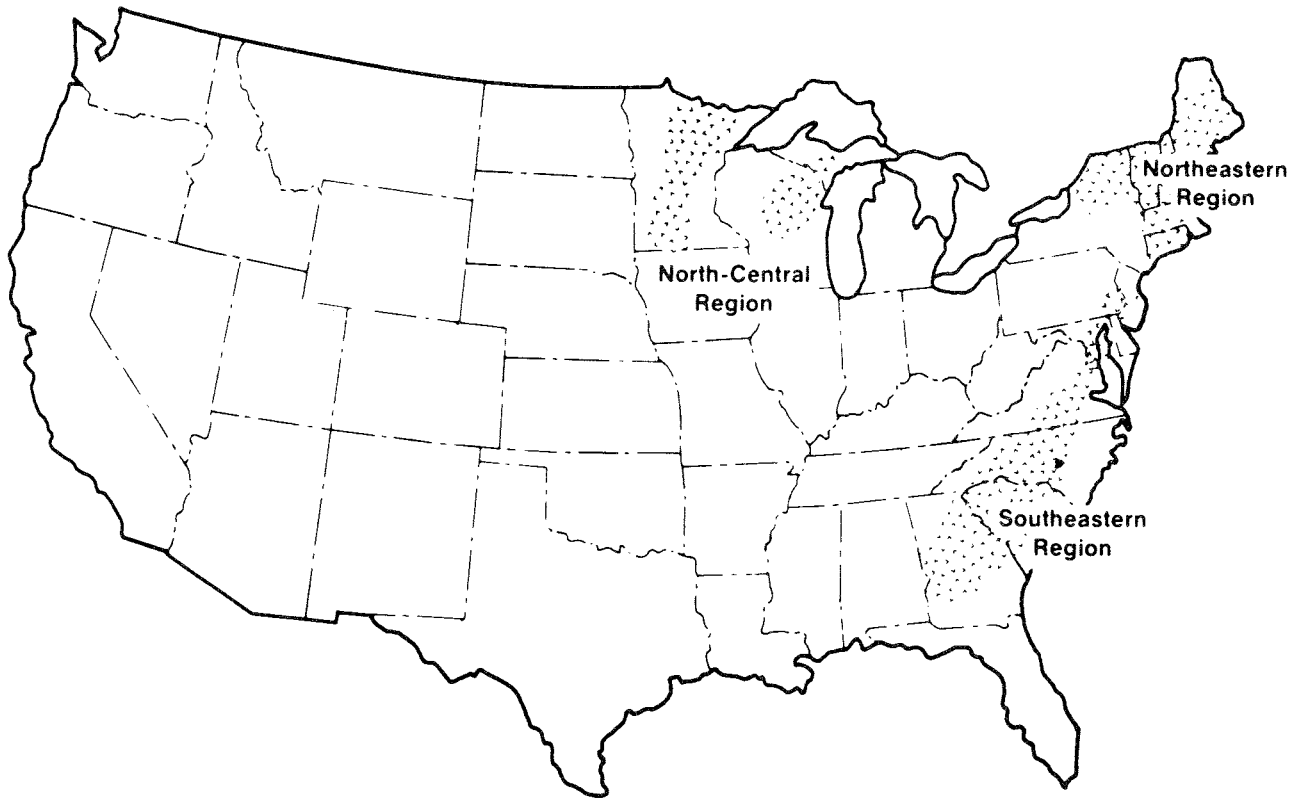
Figur 2.2.1.2. Referenceløst for første geologiske deponi.

Hämtad ur: Mission Plan for the Civilian Radioactive Waste Management Program, Juni 1985 DOE/RW-0085, Volym 1.



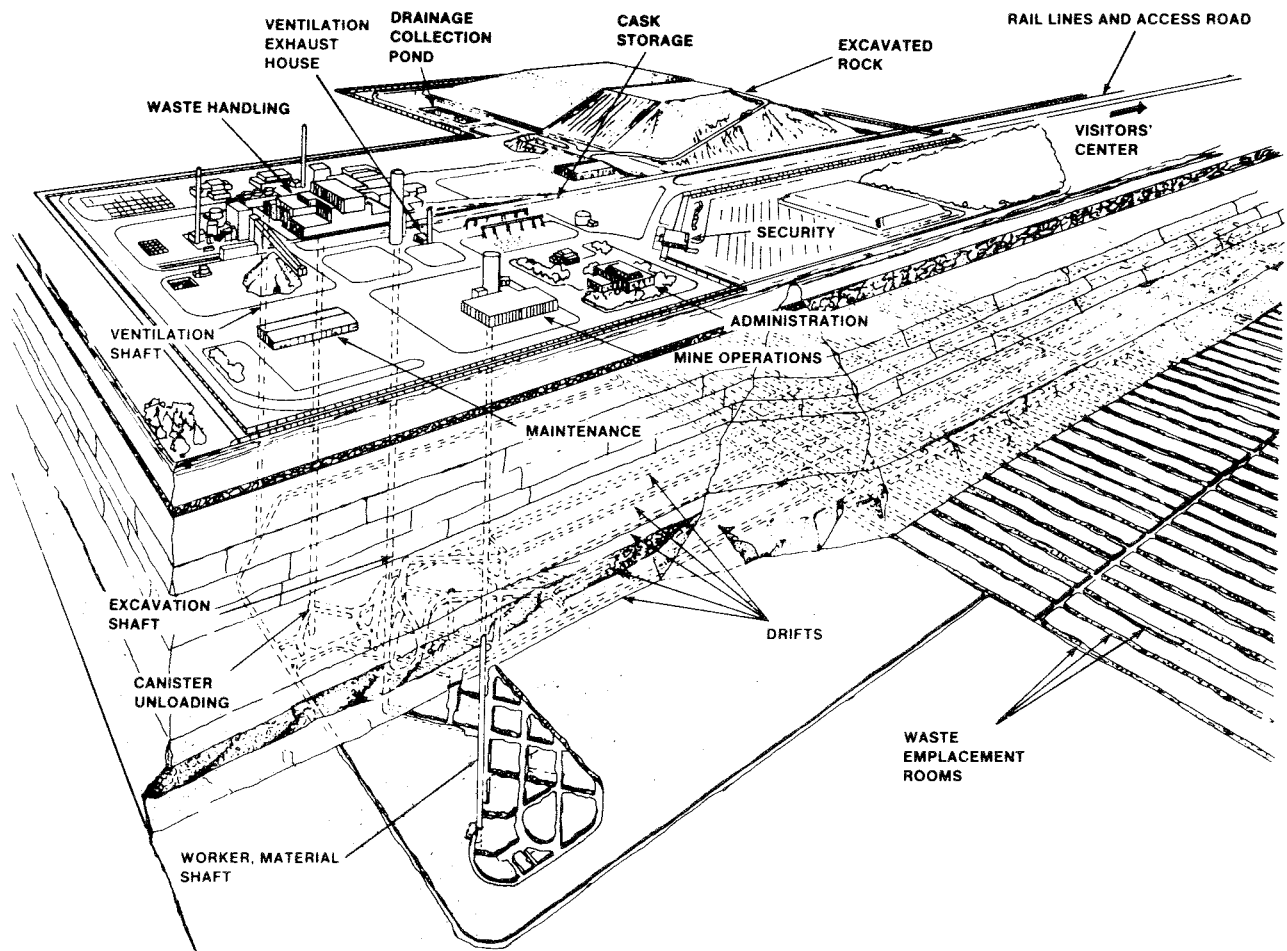
Figur 2.2.1.3. Løst for det andet geologiske deponi.

Hämtad ur: Mission Plan for the Civilian Radioactive Waste Management Program, Juni 1985 DOE/RW-0085, Volym 1.



Figur 2.2.1.4. Regions being considered for the second repository.

Hämtad ur: Mission Plan for the Civilian Radioactive Waste Management Program, Juni 1985 DOE/RW-0085, Volym 1.



Figur 2.2.1.5. Schematic of surface and underground facilities.

Hämtad ur: Mission Plan for the Civilian Radioactive Waste Management Program, Juni 1985 DOE/RW-0085, Volym 1.

Som referensmaterial för kapseln kring avfallet har man valt lågkolstål vid förläggning i salt och basalt samt rostfritt stål vid placering i tuff-lager. Undersökningar av andra material fortsätter dock, exempelvis koppar och kopparlegeringar för förläggning i basalt, tuff och kristallina bergarter.

Som buffertmaterial mellan kapsel och berg överväger man att använda en blandning av krossad basalt och bentonit vid förläggning i basalt, krossat salt vid placering i saltlager och krossad tuff eller inget buffertmaterial alls vid tuff-alternativet.

Det kan bli nödvändigt att uppföra en försöksanläggning vid den aktuella geologiska formationen för att ta fram kompletterande data, men DOE har skjutit på avgörandet om detta till slutet av 1987.

Enligt Nuclear Waste Policy Act skall DOE utreda en s k MRS-anläggning (Monitored Retrievable Storage). Denna anläggning skulle utgöra ett centralt lager för använt bränsle och solidifierat högaktivt avfall enligt DOE:s planer år 1984. För närvarande utreder man ett annat alternativ, en s k Integral MRS Facility. Den primära funktionen för en sådan anläggning är behandling av det använda bränslet och det solidifierade högaktiva avfallet före placeringen i slutförvaret. Lagringsfunktionen är sekundär även om den kan visa sig bli betydelsefull om färdigställandet av slutförvaret inte skulle ske i tid. En skiss av MRS-anläggning visas i Figur 2.2.1.6. Kapaciteten i behandlingsanläggningen är 3 600 ton uran per år och lagringskapaciteten anses behöva vara ca 15 000 ton uran. DOE

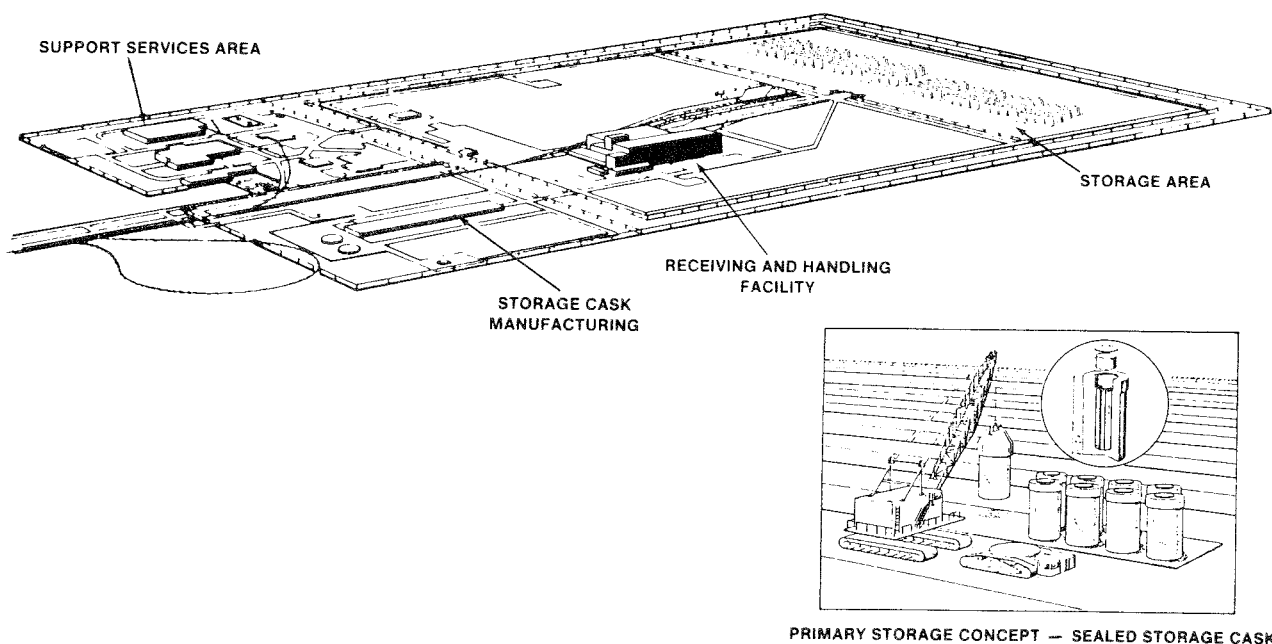
avser att i början av 1986 föreslå kongressen uppförande av en MRS-anläggning /2.2.1.15/. Tre potentiella förläggningsplatser i Tennessee studeras f n /2.2.1.16/. Enligt de preliminära planerna skulle anläggningen en börja tas i drift 1996 och uppnå full kapacitet 1998. Inlämnandet av DOE:s förslag till kongressen har tills vidare stoppats av en domstol i Tennessee /2.2.1.17/.

Då det gäller använt bränsle skulle behandlingen i anläggningen huvudsakligen omfatta dels demontering av bränsleelement, dels inneslutning av bränslestavarna tätpackade i stålbehållare som fylls med argon och svetsas igen. För lagring i MRS-anläggningen är huvudalternativet för närvarande stora stålfordrade betongcylindrar enligt Figur 2.2.1.7.

Lågaktivt avfall

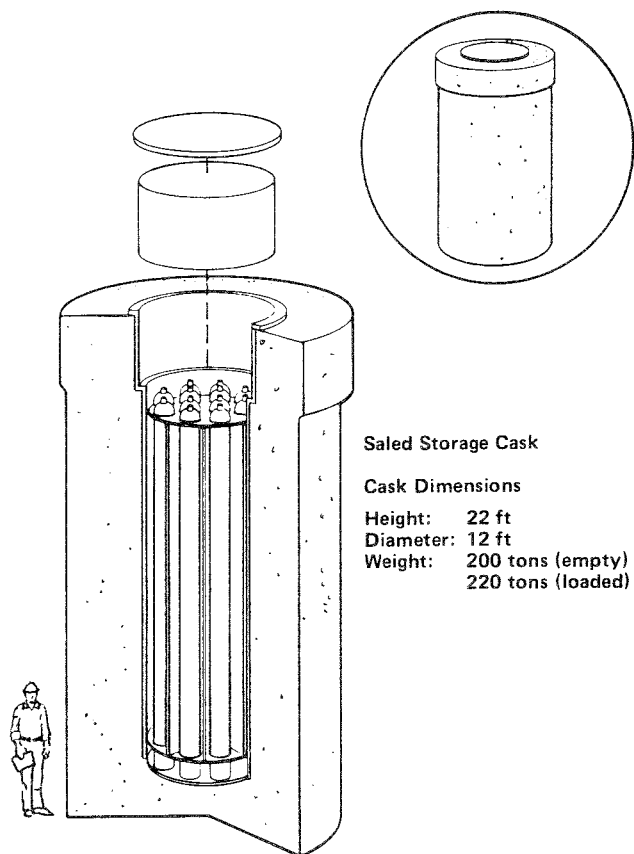
Deponering av kortlivat låg- och medelaktivt avfall skall ske genom marknedgrävning. Vid de anläggningar, som nu är i drift, placeras avfallskollin i diken, som är 6-15 m djupa, 9-12 m breda och ca 180 m långa. När en sektion av diket är fyllt täcker man med ett 0.6 - 1.8 m tjockt lager av jord med låg vattengenomsläpplighet /2.2.1.18/.

Stigande kostnader för deponering har medfört att kompaktering, förbränning och andra förbehandlingsmetoder kommit till ökad användning.



Figur 2.2.1.6. Monitored retrievable storage facility.

Hämtad ur: Mission Plan for the Civilian Radioactive Waste Management Program, Juni 1985 DOE/RW-0085, Volym 1.



Figur 2.2.1.7. Sealed storage cask.

Hämtad ur: Mission Plan for the Civilian Radioactive Waste Management Program, Juni 1985 DOE/RW-0085, Volym 1.

Amerikansk strategi för platsval och design

Det dokument som ligger till grund för platsundersökningar och design i USA kallas "Mission Plan for the Civilian Radioactive Waste Management Program" US DOE, June 1985. Man skriver att denna plan syftar till att definiera olösta frågor och att beskriva planerad verksamhet för att besvara dessa. Vissa data finns att tillgå i öppna litteraturen och federala register, medan vissa data måste samlas in i fält. Speciellt svåra frågor som man listat är:

- Modellering av sprickor och tvåfasflöde.
- Fastställande av grundvattens transporttider.
- Demonstration av "waste package"-funktionen (waste package innehåller bränsle, kapsel och buffert).
- Fastställande av radionuklidernas sorption.
- Lösighetsvärden och uppdelning av nuklider.
- Bergets respons till värmeproduktionen i avfallslagret.

Större delen av "Mission Plan" ägnas också åt ovanstående frågor och hur man genom borrhningar, mätningar, analyser, schaktsänkningar och beräkningar skall kunna ge svar på dessa.

"Mission Plan" beskriver också de steg och tidplaner som skall följas för första och andra avfallslagret. Det första lagret som skall vara klart att ta emot bränsle 1998, kommer att ligga i salt (Deaf Smith, Texas), Tuff Yucca Mountain, Nevada) eller basalt

(Hanford Washington). Dessa tre platser offentliggjordes den 28 maj 1986 och nästa steg är detaljerade platsundersökningar inklusive schaktsänkningar.

Beträffande det andra förvaret som enligt lagen skall vara klart att ta emot använt bränsle år 2005 skjuter man på alla platsvalsinriktade aktiviteter ca 10 år. Motivet till förskjutningen anges vara att mindre använt bränsle produceras än vad som tidigare beräknats.

För svensk del innebär det att data från platsval i kristallint berg i USA kommer att dröja så länge att resultaten, när de kommer, ej hinner användas för våra bedömningar. Enligt uppgift från DOE kommer dock de internationella aktiviteterna att fortsätta oförändrat. Detta innebär att man ämnar delta i Stripa-projektet fas 3.

Platsundersökningsstrategi

Man delar in platsundersökningarna i sju tekniska delar. Dessa är:

- 1 Geologiska undersökningar innehållande stratigrafi, strukturgeologi, seismologi, tektonik, geofysik, paleoklimatologi, geomorfologi och resursutvärdering. Data skall användas för att utvärdera nuvarande förhållanden i bergmassan samt effekter av utsprängning, bränsletillförsel och därefter de geologiska barriärernas betydelse för avfallslagrets långsiktiga säkerhet.
- 2 Borrhningar och borrhålsundersökningar innehållande kärnloggning, geofysikloggning och en mängd andra tester.
- 3 Geokemiska undersökningar för att utvärdera kemiska aspekter både i bergmassan och eventuellt omgivande bergformationer av annan karaktär samt vattnet i bergmassorna. Dessa studier syftar till fastställande av in-situ-förhållandenas påverkan på "waste package" och bergets förmåga att innehålla och bromsa radionukliderna genom kemiska processer.
- 4 Hydrologiska studier såsom pumpförsök i borrhål, åldersdatering på grundvatten, hydraultester, spår-försök, utveckling av modeller för flödesberäkningar, ytvattenstudier och beräkning av översvämningensrisk.
- 5 Omgivningsstudier innehållande väderleksförhållanden, luftkvalitet, djur- och växtliv, jordbrukspotential, kulturella och arkeologiska förhållanden, ljudnivåer och bakgrundsstrålning.
- 6 Socioekonomiska studier omfattande demografisk karakterisering, arbetskraftsstruktur, boningshus, kommunal service och användning av omgivande land.
- 7 Säkerhetsanalys för att fastlägga det naturliga systemets möjligheter att isolera avfallet. Man uppnår detta genom att identifiera potentiella strömrör (pathways) och därefter beräkna radionuklidernas migration ur avfallslagret. Säkerhetsanalysen är också ett viktigt instrument för att definiera övriga databehov och att prioritera dessa behov.

För att mera konkret fastlägga hur man skall gå tillväga har en detaljerad plan fastlagts, med datum

när olika aktiviteter och rapporteringar skall vara avslutade se Bilaga A i "Mission Plan".

Riktlinjer

För det tekniska arbetet finns en mängd riktlinjer som ingår som Bilaga B i "Mission Plan".

Det är mycket svårt att skaffa sig en överblick av vilka riktlinjer som föreligger och vilka resultat som anses kvalificerande respektive diskvalificerande. Man lägger dessutom till nivåerna gynnsamma respektive potentiellt ogynnsamma förhållanden. När man läser riktlinjerna får man en känsla av att det trots allt rör sig om ganska logiska utgångslägen, som har sin motsvarighet även i det svenska programmens koncept och säkerhetsanalys. Ett exempel är riktlinjerna för erosionskriteriet:

- Kvalificerande förhållanden – Platsen skall vara sådan att ett avfallslager kan placeras så att erosionen troligen ej leder till att radionuklider släpps ut högre än de gränsvärden som angetts.
- Diskvalificerande förhållanden – platsen medger inte att hela avfallslagret placeras minst 200 m under markytan.

Undantaget från de till stora delar resonemangsbe- tonade delarna är riktlinjer för vattentransporttid.

- En plats är diskvalificerad om grundvattenförhållandena på en plats är sådana att grundvattentransporttiden från den störda zonen till biosfären är kortare än 1000 år.

Det finns dock en möjlighet att NRC kan ge dispens om detta sistnämnda krav ej är uppfyllt. En annan fråga som därmed aktualiseras är den störda zonen, som ingenstans definieras i "Mission Plan".

Vad som nu sker i det amerikanska programmet är att de tre valda platserna för detaljerade platsundersökningar kommer att undersökas de närmaste fem åren.

Prövning av om den rekommenderade platsen uppfyller "Mission Plan" kommer att ske av NRC 1991-1993.

2.2.2 Kanada

Kärnkraftprogram

Kanada har 16 kraftreaktorer med totala kapaciteten 10,1 GWe i drift och ytterligare 8 enheter på totalt ca 6 GWe under byggnad eller beställda /2.2.2.1/. Samtliga är av den inom landet utvecklade CANDU-typen (tungvattenmodererad och- kyld tryckreaktor som drivs med naturligt uran), som visat sig mycket driftsäker. Kärnkraften svarade 1984 för ca 12% av elproduktionen /2.2.2.2/.

Dagens hantering av kärnavfallet

Driftavfall från reaktorerna lagras efter behandling av de olika kraftbolagen vid någon av deras reaktorstationer. Använt kärnbränsle lagras f n i bassänger vid reaktorstationerna. Mängden uppgår f n till ca 9 000 ton uran /2.2.2.3/. Sedan ett tiotal år tillbaka pågår

fullskaleförsök med torrlagring av utbränt kärnbränsle i betongcylindrar vid Whiteshell Nuclear Research Establishment i Manitoba /2.2.2.4/. Inga påtagliga förändringar har hittills kunnat konstateras.

Ansvarsfördelning och lagstiftning

AECL (Atomic Energy of Canada Ltd) är den federala organisation som har ansvaret för Kanadas kärnkraftprogram. AECL svarar också för forsknings- och utvecklingsprogrammet rörande förbehandling och slutförvaring av kärnbränsleavfall, medan det delstatsägda kraftföretaget Ontario Hydro har ansvaret för mellanlagring och transport av använt kärnbränsle. Ansvaret för den slutliga förvaringen av avfallet åvilar provinsregeringen och den federala regeringen.

AECB (Atomic Energy Control Board) är den viktigaste centrala myndigheten för tillståndsgivning och övervakning. AECB publicerade 1985 riktlinjer och kriterier för slutförvaring av högaktivt avfall. /2.2.2.5/

TAC (Technical Advisory Committee) är ett rådgivande organ som granskar de tekniska programmen rörande avfallshantering.

Kärnavfallsprogram /2.2.2.6, 2.2.2.7, 2.2.2.8/

Kanada håller öppen frågan om upparbetning eller direktdeponering av bränslet och utför utvecklingsarbeten för båda alternativen.

De kanadensiska arbetena i samband med slutförvaring av använt kärnbränsle (eller ev förglasat högaktivt avfall från upparbetning) är huvudsakligen inriktade på förläggning av förvaret i urberg. Saltformationer och sedimentära lager har varit föremål för ganska begränsade undersökningar. Kanada deltar också i OECD/NEA:s studier rörande "sub-seabed disposal". Det är dock främst områden med eruptiva djupbergarter, som blivit föremål för det största intresset. Enbart i Ontario, den delstat dit kärnkraftproduktionen är koncentrerad, har man identifierat 1 400 sådana områden där magman trängt upp, men stelnat innan den nått ytan. Dessa formationer anses särskilt lämpade för förläggning av slutförvar.

Omfattande forsknings- och utvecklingsinsatser pågår f n. Avsikten är att år 1988 för myndigheterna lägga fram en säkerhetsredovisning av ett utarbetat förslag till utformning av ett slutförvar. Val av förläggningsplats blir en viktig uppgift under 1990-talet. En demonstrationsanläggning skall sedan byggas på den utvalda platsen. Det egentliga slutförvaret beräknas inte tas i drift förrän efter 2010.

En central plats i utvecklingsarbetena under de närmaste åren kommer att intas av Underground Research Laboratory (URL), som nu byggs 250 m under marken i en granitformation vid Lac du Bonnet nära Whiteshell i Manitoba /2.2.2.9/. Ett 15 km² stort område runt URL skall bli föremål för mycket noggranna hydrologiska studier under flera år /2.2.2.10/. Två andra områden, belägna i Ontario, är också föremål för mer omfattande geologiska, hydrologiska och geokemiska undersökningar: en granitformation vid Atikokan och en gabbroformation vid East Bull Lake.

De kanadensiska arbetena på förglasning av fissionsprodukter och aktinider omfattar både borsilikat- och aluminiumsilikatglas. Viss utvecklingsinsats ägnas även keramer.

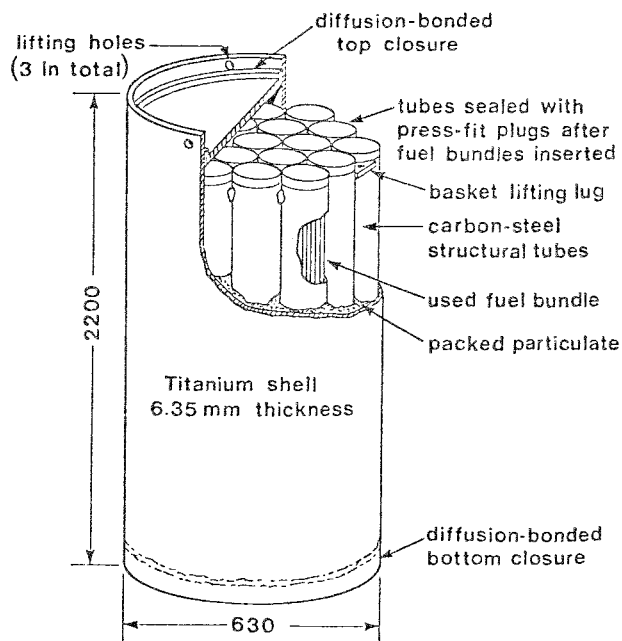
I programmet för kapslar i samband med slutförvaring ingår olika metaller såsom rostfritt stål, nickellegeringar, koppar och titan, men man studerar också kemiska material, exempelvis oxider av aluminium, zirkonium och titan /2.2.2.11/.

Huvudalternativet är en relativt tunnväggig metallbehållare i vilken bränslestavarna placeras, varpå mellanrummen fylls med smält metall eller kornförmigt material. Ett exempel visas i Figur 2.2.2.1. /2.2.2.12/. Frigörelsen av aktivitet från kärnbränsle i kontakt med grundvatten är föremål för omfattande studier.

För buffertmaterial mellan kapsel och berg är huvudintresset knutet till bentonit och illit.

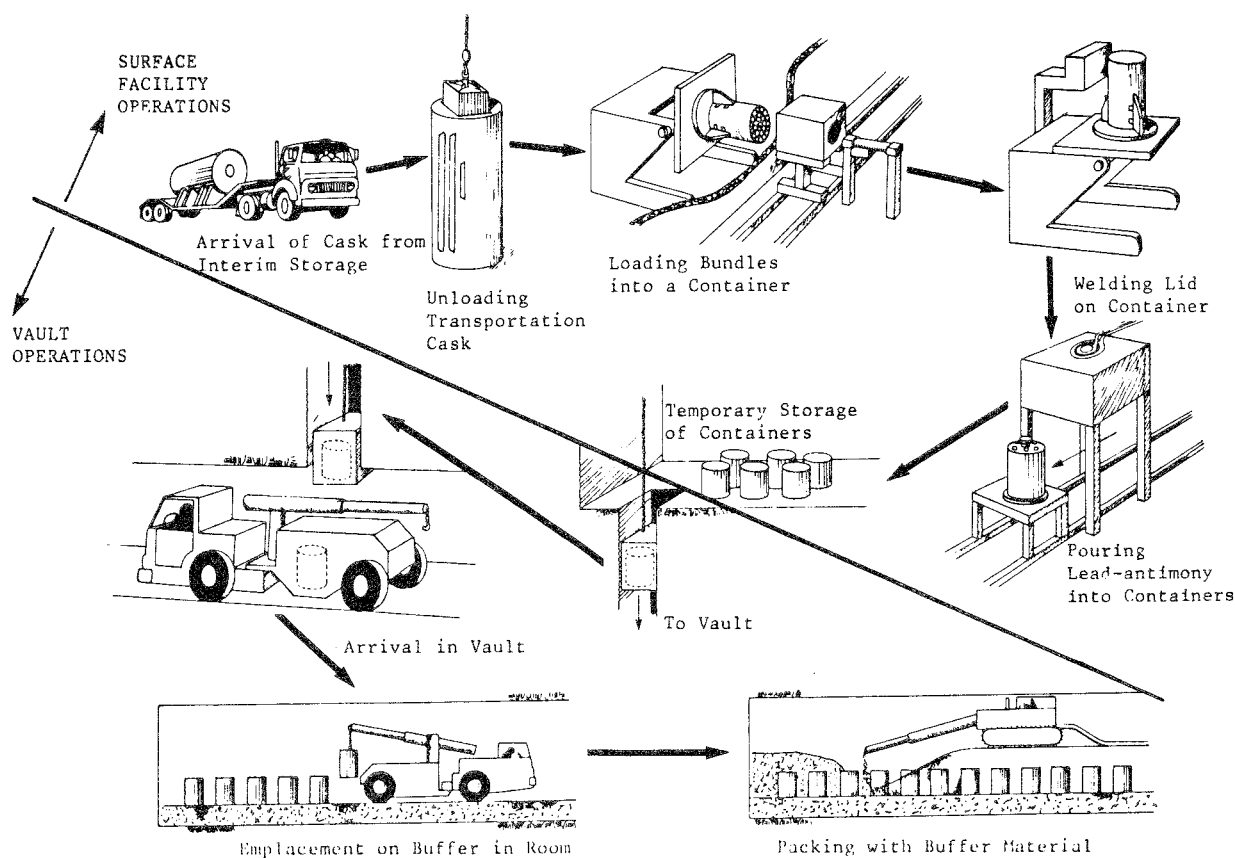
Hanteringen vid slutförvaret och den allmänna utformningen av detsamma framgår av Figur 2.2.2.2, 2.2.2.3 och 2.2.2.4 /2.2.2.14, 2.2.2.15/.

Omfattande arbete har lagts ned på vidareutveckling av den metodik för säkerhetsanalyser, SYVAC (System Variability Analysis Code), som publicerades redan 1981 /2.2.2.13/.



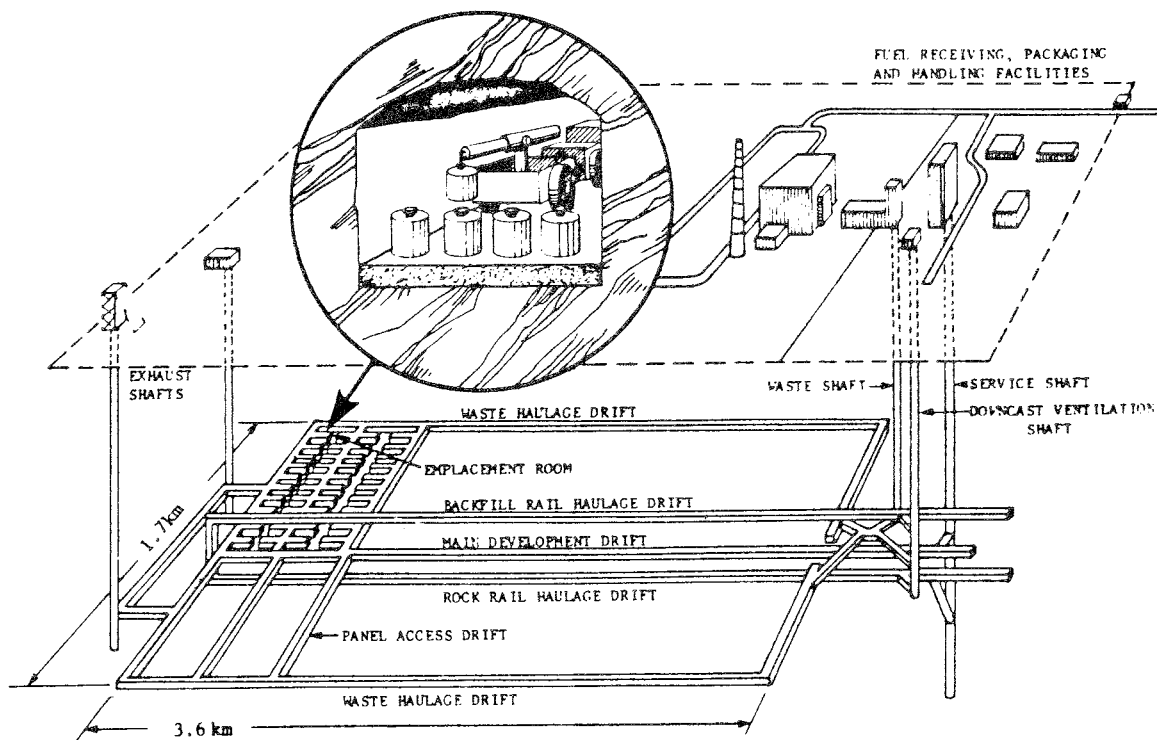
Figur 2.2.2.1. Conceptual design of structurally-supported container for the disposal of used CANDU fuel bundles. Dimensions in mm.

Hämtad ur: "Engineered Barrier Research in Canada". Nutall et al. International Symposium on the Siting, Design and Construction of Underground Repositories for Radioactive Wastes. Hannover 3-7 mars 1986. IAEA-SM289/21.



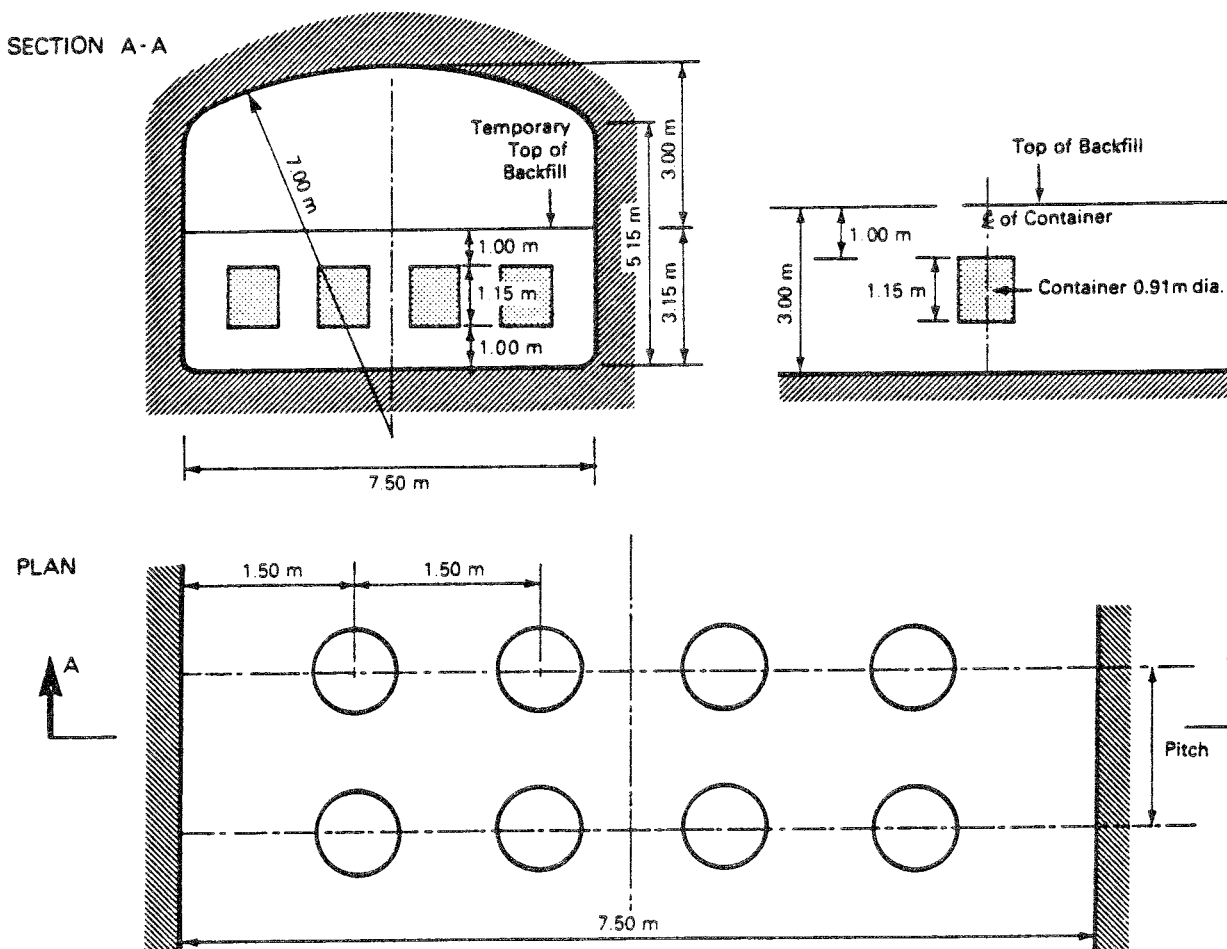
Figur 2.2.2.2. Activities at a Disposal Centre for Used Fuel. (Acres et al. 1980a)

Hämtad ur: "Second interim assessment of the Canadian concept for nuclear waste disposal", volym 1. AECL, juli 1985.



Figur 2.2.2.3. Layout of Disposal Facilities (Acres et al. 1980a). (Drawings not to scale. Only a fraction of the rooms off the panel drifts are shown.)

Hämtad ur: "Second interim assessment of the Canadian concept for nuclear waste disposal", volym 2.



Figur 2.2.2.4. Irradiated Fuel Emplacement Room at Container Geometry.

Hämtad ur: "Safety Assessment of a Conceptual Design of a Facility for Geological Disposal of CANDU Nuclear Fuel in the Canadian Shield".

Nathwani et al. International Symposium on the Siting, Design and Construction of Underground Repositories for Radioactive Wastes. Hannover 3-7 mars 1986. IAEA-SM289/25.

2.2.3 Frankrike

Kärnkraftprogram

Frankrike har 43 kraftreaktorer i drift med en total kapacitet på ca 40 GWe och ytterligare 20 GWe är under byggnad /2.2.3.1/. Kärnkraft svarar för ca 70% av elproduktionen.

De flesta reaktorerna är tryckvattenreaktorer och ägs av det statliga kraftbolaget EDF (Electricité de France). Under hösten 1985 togs Superphenix, en naturumkyld snabb bridreaktor på 1200 MWe, i drift.

Den mängd utbränt bränsle som producerats under årens lopp har uppskattats till 8 000 ton från de gaskylda grafitmodererade reaktorerna med naturligt uran, vilka dominerade det franska kärnkraftprogrammet till att börja med. /2.2.3.2/ Största delen av detta bränsle har upparbetats. Från tryckvattenreaktorerna har hittills producerats ca 2 700 ton utbränt bränsle.

Om kärnkraftutbyggnaden sker i den takt man nu planerar, skall ca 60 GWe vara i drift 1990 och 75 GWe år 2000. Mängden använt bränsle skulle då totalt uppgå till ca 20 000 ton år 2000 /2.2.3.3/.

Dagens hantering av kärnavfallet

Använt bränsle lagras i bassänger vid reaktorerna innan det transporteras till upparbetningsanläggningarna. Lagringskapaciteten vid upparbetningsanläggningen i La Hague är under utbyggnad och kommer 1987 att uppgå till 8 000 ton uran /2.2.3.2/.

Högaktivt avfall från upparbetningsanläggningen i Marcoule förglasas och innesluts i behållare av rostfritt stål (diameter 0.5 m, höjd 1 m). Dessa behållare lagras i 10 m djupa luftkylda hål i en underjordisk betongkonstruktion vid anläggningen. Kapaciteten på detta lager har utökats till 2200 behållare /2.2.3.4/.

Transuranavfall underkastas olika volymsreducerande förfaranden (förbränning, kompaktering) och packas i tunnor. En del innesluts i cement eller bitumen. Om transuraninnehållet inte överstiger 1 Ci/m³ kan det skickas till deponeringsanläggningen för lågaktivt avfall (La Manche) vid La Hague, i annat fall lagras det på plats för att senare överföras till ett framtida underjordiskt förvar.

Det lågaktiva avfall, som bildas vid drift av bränslefabriker, reaktorer, upparbetningsanläggningar och forskningsstationer uppgår till ca 25 000 m³ per år, men beräknas stiga till omkring 70 000 m³ år 2000 /2.2.3.5/. Ca 40% av detta uppkommer vid drift av reaktorerna.

Det lågaktiva avfallet behandlas enligt ett flertal gängse metoder. Vid många reaktorer använder man cementingjutning, men plastingjutning förekommer också. Vid forskningsstationerna i Marcoule, Saclay och Cadarache används ingjutning i bitumen. Det behandlade lågaktiva avfallet skickas för deponering till Centre de la Manche.

Deponeringssättet vid La Manche-anläggningen beror på strålningsnivån i avfallskollit. Om strålningsnivån är låg placeras tunnorna i ett stort betongdike, mellanrummen fylls med jord och ovanpå läggs ett tjockt lager tät lera och sedan jord. Avfallskollin som behöver ytterligare strålskydd kringgjuts med betong.

Ansvarsfördelning och lagstiftning

Commissariat à l'Énergie Atomique, CEA, som lyder direkt under regeringen, har ansvaret för både de civila och militära nukleära programmen. Compagnie Générale des Matières Nucléaires, COGEMA, som lyder under CEA, bildades 1976 för att ta hand om de kommersiella aspekterna av bränslecykeln. Dit hör uranprospektering, uranutvinning, anrikning, bränsletillverkning, upparbetning och transporter.

Agence National pour la Gestion des Déchets Radioactifs, ANDRA, som också tillhör CEA, har bildats för att förbereda och genomföra långtidslagring och deponering av radioaktivt avfall. Kostnaden för verksamheten tas ut av kraftföretag och andra, som producerar avfallet.

Institut pour la Protection et la Sûreté Nucléaire, IPSN, inom CEA har ansvaret för säkerhetsfrågor inom verksamheten.

För lågaktivt avfall har detaljerade bestämmelser utfärdats /2.2.3.6/. Däremot har sådana ännu inte publicerats för deponering av högaktivt avfall.

Kärnavfallsprogram

I den franska bränslecykelpolicyn ingår upparbetning av använt kärnbränsle. Plutonium och uran, som därvid utvinnes, skall i första hand återföras för drift av tryckvattenreaktorer, eftersom den tidigare förutsedda kraftiga expansionen av bridreaktorprogrammet ej kommit till stånd /2.2.3.7/.

Den första stora upparbetningsanläggningen, UPI vid Marcoule, som sedan starten 1958 upparbetat ca 2 000 ton bränsle från gaskylda reaktorer, har försetts med en ny mottagnings- och avkapslingsanläggning, varigenom kapaciteten ökats till ca 800 ton uran per år. Bränsle från de franska gaskylda reaktorerna skall i fortsättningen gå uteslutande till Marcouleanläggningen, medan La Hague skall upparbeta endast lättvattenbränsle. UP2-anläggningen vid La Hague, som togs i drift 1967 för upparbetning av bränsle från gaskylda reaktorer, kompletterades 1976 med en ny förbehandlingsdel så att även oxidbränsle från tryckvattenreaktorer kunde tas omhand. Den nominella kapaciteten var 400 ton uran per år, men genomgången har i praktiken varit lägre, totalt ca 1 300 ton lättvattenbränsle till i mitten av 1985 /2.2.3.8/. För närvarande befinner sig La Hague-anläggningen i ett intensivt utbyggnadsskede /2.2.3.9/. En helt ny upparbetningsfabrik, UP3A, med kapaciteten 800 ton uran per år skall starta 1988-89 och den gamla UP2-anläggningen skall kompletteras, så att kapaciteten ökas till 800 ton uran/år, år 1990.

Bränsle från snabba bridreaktorer upparbetades under perioden 1969-1979 i en pilot-anläggning, AT-1, vid La Hague. Därefter har upparbetning skett i en pilotanläggning i Marcoule. Den senare har sedan kompletterats och byggts ut till en kapacitet på 5 ton uran/år (TOR: Traitement d'Oxydes Rapides). Bränsle från Phenix-reaktorn har också upparbetats i UP2-anläggningen vid La Hague efter utspädning med lösningar från upplösning av bränsle från gaskylda reaktorer.

Vid La Hague lagras det högaktiva avfallet från

upparbetningsprocesserna i form av sura lösningar under omrörning i vattenkylda rostfria tankar. En förglasningsanläggning av samma typ som den i Marcoule är under uppförande vid La Hague. Den beräknas kunna tas i drift 1987 och skall senare följas av ytterligare en anläggning /2.2.3.10/.

Det är flera typer av geologiska formationer, som kan tänkas bli aktuella vid förläggning av ett slutförvar för högaktivt avfall; granit, gnejs, salt, skiffer och lera.

Fältundersökningarna har hittills huvudsakligen inriktats på graniter i Massif Central, bl a Monts d'Auriat i Limousin och en gruvgång i en gammal urangruva vid Fanay-Augères, men man har nu valt ut ett område för vardera granit, lera, skiffer och salt där geologiska undersökningar skall påbörjas under 1986 /2.2.3.11, 2.2.3.12/. Man planerar ett underjordslaboratorium. Platsen för ett sådant laboratorium skall utses före 1987 och enligt planerna skall man till 1992 ha avslutat och redovisat resultaten av ett omfattande försöksprogram. Därefter kan man besluta om den aktuella platsen är lämplig för slutförvaring. I så fall byggs den underjordiska försöksanläggningen om till ett nationellt slutförvar. Denna ursprungliga tidplan är emellertid nu försenad.

När det gäller tiden fram till deponering i slutförvar studerar man olika alternativ. Ett förslag är att förvara det förglasade avfallet under luftkylning ovan jord i 30 år. Det leder till ganska hög temperatur nere i slutförvaret (upp mot 140°C). Ett annat förslag är att man förvarar avfallet ovan jord mycket längre, ända upp till 200 år. Mer av aktiviteten har då avklingat och slutförvaret kan göras betydligt mindre. Ett tredje förslag är att man redan från början placerar avfallet i slutförvaret, men utformar det så att det blir luftkylt, och alltså öppet och åtkomligt under mycket lång tid. Man skulle då slippa mellanlagring ovan jord /2.2.3.13/.

Slutförvaring av förglasat högaktivt avfall från upparbetning på stort djup i en lämplig geologisk formation på land är således det främsta huvudalternativet. Man deltar dock även i det internationella samarbetet inom OECD/NEA rörande slutförvaring under havsbotten.

Deponeringsanläggningen för lågaktivt avfall, Centre de la Manche, som varit i drift sedan 1969, har hittills tagit emot ca 300 000 m³ avfall /2.2.3.14/. För närvarande pågår platsundersökningar för ytterligare deponier för lågaktivt avfall, bl a har en plats i departementet Aube (Soulaines) valts ut för fortsatta undersökningar och licensiering /2.2.3.15/. Vid positivt utfall skulle det nya förvaret för lågaktivt avfall kunna börja byggas 1988 och vara klart för idrifttagning 1990.

2.2.4 Västtyskland

Kärnkraftprogram

Den installerade kärnkraften i Västtyskland uppgår till 17.3 GWe (20 reaktorer), 7.0 GWe är under byggnad och ytterligare 3.9 GWe är beställda /2.2.4.1/. Kärnkraft svarade 1985 för ca 30% av elproduktionen i landet. Lättvattenreaktorer är den nästan helt dominerande reaktortypen.

Dagens hantering av kärnavfallet

Använt kärnbränsle lagras i bassänger vid reaktorstationerna. Den ackumulerade mängden utbränt bränsle uppgår till ca 2 700 ton uran, men beräknas stiga till 9 400 - 11 700 ton uran omkring år 2000 /2.2.4.2, 2.2.4.3/.

Det har uppskattats att den totala mängden behandlat lågaktivt avfall fram till år 2000 skulle komma att uppgå till ca 300 000 m³ /2.2.4.4/. Ca 40-50% av detta kommer från den direkta driften av reaktorerna. Ett flertal gängse behandlingsmetoder används. Det mesta avfallet gjuts dock fortfarande i cement. Avfallet från reaktordriften lagras vid stationerna och i ett centralt mellanlager vid Gorleben som togs i drift 1984 /2.2.4.5/. Under perioden 1967-1978 deponerades i saltgruvan Asse ca 125 000 fat med lågaktivt avfall och ett mindre antal fat med medelaktivt avfall /2.2.4.6/.

Ansvarsfördelning och lagstiftning

Förbundsregeringen har ansvaret för slutförvaring av högaktivt avfall. Det federala ansvaret utövas genom Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). PTB arbetar i sin tur bl a genom det federala DBE (Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH). Det åligger Bundesministerium des Innern (BMI) att ta fram de föreskrifter för avfallshanteringen som skall ligga till grund för tillståndsgivningen. Tillståndsgivare är aktuell delstatsregering. För mellanlagring av använt kärnbränsle är dock PTB tillståndsgivande myndighet. PTB gav sålunda 1983 BGR (Brennelementlager Gorleben GmbH) tillstånd att under 40 år lagra använt LWR-bränsle i ett mellanlager på 1 500 ton uran i Gorleben. Det gäller lagring i luftkylda sk Castor-behållare. RSK (Reaktorsicherheitskommission) och SSK (Strahlenschutzkommission) spelar en viktig rådgivande roll vid tillståndsärenden.

BMFT (Bundesministerium für Forschung und Technologie) svarar för de federala forsknings- och utvecklingsinsatserna på området.

Kärnkraftföretagen kanaliserar sina insatser i fråga om "Entsorgung" (upparbetning och avfallshantering) genom DWK (Deutsche Gesellschaft für Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen). Ett dotterbolag till DWK är BGR (Brennelementlager Gorleben GmbH).

RSK (Reaktorsicherheitskommission) offentliggjorde i början av 1983 kriterier för slutförvaring av radioaktivt avfall i geologiska formationer /2.2.4.7/. De givna kriterierna är ganska allmänna i sin utformning.

Kärnavfallsprogram /2.2.4.8/

Den nuvarande västtyska strategin på bränslecykelområdet innebär att:

- använt kärnbränsle lagras torrt i metallbehållare vid ett eller flera centrala lager,
- en viss mängd (ca 4 000 ton) använt bränsle skall upparbetas av COGEMA vid den franska anläggningen i La Hague och av BNFL (British Nuclear Fuels) i Sellafield,

- en relativt liten upparbetningsanläggning (350 t/år) uppförs inom landet,
- plutonium, som utvinnes vid upparbetningen, skall återföras i lättvattenreaktorerna, eftersom endast en mindre mängd kommer till användning i det kraftigt försenade snabbreaktorprogrammet,
- ett slutförvar för förglasat högaktivt avfall, för transuran-avfall och eventuellt för använt kärnbränsle byggs i saltlager vid Gorleben,
- alla typer av radioaktivt avfall skall slutförvaras i geologiska formationer.

Ett centralt lager för använt kärnbränsle med kapaciteten 1 500 ton uran har byggts vid Gorleben i Niedersachsen, och ett lika stort lager är under uppförande i Ahaus nära den holländska gränsen. Det senare började byggas 1984. I lagren skall bränslet förvaras i kombinerade transport- och lagringsbehållare av gjutjärn (s k Castor-behållare). Dessa skall stå vertikalt i lagret och kyls genom naturlig konvektion av luft, som kommer in vid golvet och går ut uppe vid taket.

DWK (Deutsche Gesellschaft für Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen) erhöll i början av 1985 regeringens tillstånd att i Wackersdorf i Bayern uppföra en upparbetningsanläggning på 350 årston, WA-350 /2.2.4.9/. Ett första partiellt tillstånd har också erhållits från de bayerska myndigheterna. Det gäller bl a byggandet av en mottagningsstation och ett lager (torrlagring) med kapaciteten 1 500 ton uran för behållare med använt bränsle. Lagret beräknas bli färdigställt 1989. Enligt de nuvarande planerna räknar man med att få tillstånd att uppföra huvudbyggnaden i slutet av 1987 och att kunna starta inaktiv drift 1993 och aktiv drift 1995 /2.2.4.10/. Avsikten är att även bygga en fabrik för tillverkning av blandoxid-bränsle på platsen.

Upparbetningsanläggningen uppförs av ett industrikonsortium, EWW (Errichtungskonsortium Wiederaufarbeitungsanlage Wackersdorf), med KWU (Kraftwerk Union) i spetsen /2.2.4.11, 2.2.4.12/.

Vid utformningen av upparbetningsanläggningen i Wackersdorf bygger man bl a på erfarenheter från den pilot-anläggning (WAK, nominell kapacitet ca 35 t/år), som med vissa avbrott varit i drift vid Karlsruhe sedan 1971.

BMFT (Bundesministerium für Forschung und Technik) och DWK (Deutsche Gesellschaft für Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen) har vid Eurochemics anläggning vid Mol i Belgien uppfört en pilot-anläggning, där förglasning av högaktivt avfall enligt det s k PAMELA-förfarandet utprovas. Borsilikatglas används och slutprodukten är antingen glasblock eller glaspärlor i en matris av metall, exempelvis bly.

I Karlsruhe har byggts en försöksanläggning för förglasning enligt den franska AVM-metoden.

För slutförvaring av förglasat högaktivt avfall (eller ev använt bränsle) har man i Västtyskland i första hand intresset inriktat på saltformationer. Vid Gorleben i Niedersachsen pågår förberedelsearbetet för att sänka två schakt ned till ca 850 m djup /2.2.4.13/. Arbetena med att bygga schakten beräknas ta ca 4 år och därefter skall ett undersökningsprogram genomföras i anläggningarna under jord.

Om undersökningarna ger positiva resultat räknar man i de nuvarande planerna med att slutförvaret skall kunna börja tas i drift i slutet av 1990-talet.

I den nedlagda saltgruvan Asse utanför Braunschweig pågår experiment rörande bergsaltets mekaniska och termiska egenskaper. Man planerar också bl a försöksdeponering av behållare med glas, innehållande aktivt cesium och strontium. Det senare försöket sker inom ramen för ett samarbete med USA /2.2.4.14, 2.2.4.15/. Om Asse-gruvan också skall tjänstgöra som slutförvar för vissa typer av radioaktivt avfall kommer troligen att avgöras under 1987.

Direktdeponering av använt kärnbränsle har varit föremål för omfattande utredningar. En rapport presenterades i början av 1985, men arbetet kommer att fortsätta, även om huvudalternativet f n är upparbetning och förglasning av högaktivt avfall /2.2.4.16/. Den utformning av bränslekapseln som man räknade med i studien över direktdeponering framgår schematiskt av Figur 2.2.4.1 /2.2.4.17/. Bränsleelementen placeras i en behållare av nickellegeringen Hastelloy C4, som på utsidan har ett korrosionsskyddande skikt av ett keramiskt material (Nucerite). En ytterbehållare av ett speciellt gjutjärn (Sphäroguss GGG 40) ger ett extra korrosionsskydd och tjänar dessutom som strålskydd vid hanteringen. De fortsatta insatserna på direktdeponering koncentreras till förbehandling och inkapsling samt demonstrationsförsök. DWK avser att söka tillstånd för en försöksanläggning vid Gorleben. I den anläggningen skall bl a försök utföras med demontering och inkapsling av använt bränsle. Demonstration av deponeringsteknik för använt bränsle planeras i Assegruvan 1987-88 /2.2.4.18/. Vid detta försök kommer realistiska avfallskollin innehållande använt kärnbränsle att användas.

Som kapslingsmaterial för det förglasade avfallet studeras såväl metaller (titan- och nickellegeringar) som keramiska material (aluminiumoxid, zirkoniumoxid, kiselkarbid och grafit). Buffert- och återfyllnadsmaterialet i förvaret blir troligen krossat salt.

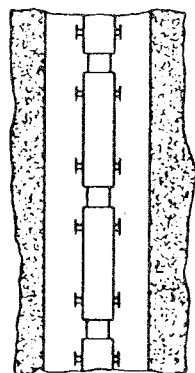
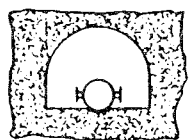
I en omfattande säkerhetsstudie genomförd av Hahn-Meitner-institutet behandlas risken för olyckor vid upparbetning, avfallsbehandling, transporter och under driftskedet för ett slutförvar /2.2.4.19/. Slutsatsen är att de olika delprocesserna är acceptabla ur strålskyddssynpunkt.

Kina har erbjudit sig att ta emot använt kärnbränsle. Bränslet skulle bli kinesisk egendom, och det kan därför senare komma att upparbetas varpå utvunnet uran och plutonium återföres i kraftreaktorer. Förhandlingar pågår om en mindre mängd utbränt bränsle (150 ton) /2.2.4.20, 2.2.4.21/.

KWU (Kraftwerk Union AG) uppför i Karlstein en förbränningsanläggning för lågaktivt avfall, ARAK (Avfallsreduzierungsanlage Karlstein). Askan gjuts in. Anläggningen beräknas kunna tas i aktiv drift under 1986 /2.2.4.22/.

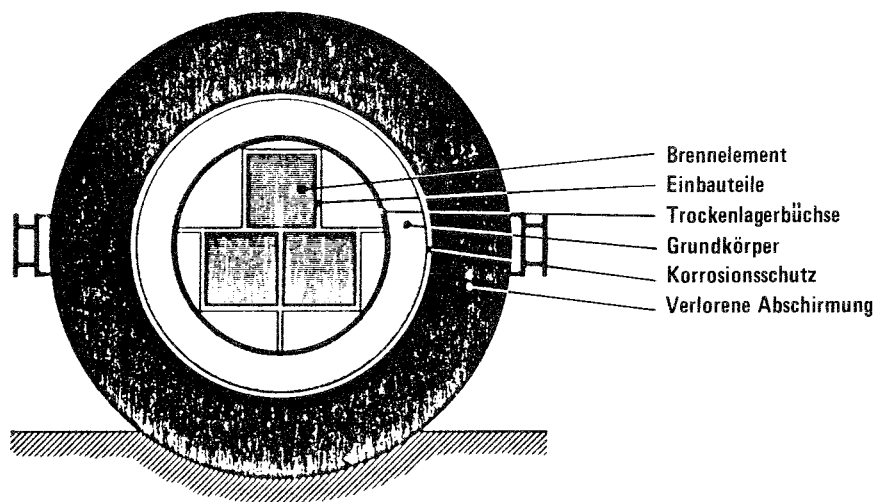
För deponering av behandlat lågaktivt avfall har man valt en gammal järngruva, Konrad, belägen mellan Braunschweig och Salzgitter-Lebenstedt. Ansökningshandlingarna i deponeringsärendet behandlas

Endlagerkonzept:



Streckenlagerung

Endlagergebinde:



Figur 2.2.4.1. Für den Systemvergleich konzipiertes Referenzkonzept der Direkten Endlagerung (schematisch).

Hämtad ur: Atomwirtschaft, Aug/Sept 1984 p 460.

f n av myndigheterna. Enligt nuvarande tidplaner skall deponering i gruvan kunna påbörjas tidigast i slutet av 1989. Man räknar med att årligen ta emot upp till 40 000 m³ avfall och bedömer f n att gruvan skall kunna ta emot totalt ca 650 000 m³ /2.2.4.4/.

2.2.5 Storbritannien

Kärnkraftprogram

Den installerade kärnkraften i Storbritannien uppgår till 11.9 GWe, ytterligare 3.3 GWe är under byggnad och 1.2 GWe är beställd /2.2.5.1/. Gaskylda reaktorer dominerar nästan helt. Uppförandet av en första tryckvattenreaktor har utretts under många år. Kärnkraften svarar för ca 17% av elproduktionen.

Dagens hantering av kärnavfallet

Den totala mängden använt kärnbränsle, som producerats i Storbritannien, har uppskattats till ca 26 000 ton /2.2.5.2/. Lagringen av använt bränsle vid reaktorerna sker i vattenkylda bassänger utom vid en reaktorstation, Wylfa, där man använder torrlagring med luftkylning.

Upparbetning av använt uranmetall-bränsle från de gaskylda reaktorerna har utförts vid Sellafieldanläggningen (tidigare kallad Windscale) sedan 1952 och av mindre mängder bränsle från snabba brytare vid Dounreay sedan 1958. Mer än 20 000 ton bränsle har behandlats vid Sellafield. Oxid-bränsle från AGR-reaktorerna och lättvattenbränsle från utländska reaktorer lagras i Sellafield i väntan på att den nya uppberedningsanläggningen, THORP, blir klar. Lagringen sker i vattenbassänger.

Det högaktiva avfallet från uppberedningen lagras i form av sura lösningar under omrörning med luft i vattenkylda dubbelväggiga rostfria tankar i en betongkonstruktion. Vid Sellafield finns ett 20-tal tankar på vardera 1 100 m³.

Produktionen av fast lågaktivt avfall uppgår till ca 30 000 m³/år, varav ca 20 000 m³ härrör från bränsletillverkning och uppberedning. Deponering sker genom marknedgrävning vid Driggs i Cumberland och i mindre omfattning vid Dounreay i Skottland. Anläggningen vid Driggs har hittills tagit emot ca 500 000 m³ lågaktivt avfall. Fram till 1984 dumpades stora mängder lågaktivt avfall i havet ca 700 km sydväst om Land's End. Avfallet var ingjutet i plåtfat. Medelaktivt avfall, huvudsakligen från uppberedningen, lagras i tankar eller förvar. Man räknar med ca 55 000 m³ av sådant avfall fram till år 2000 /2.2.5.3/.

Ansvarsfördelning och lagstiftning

Department of the Environment (DOE) svarar för den allmänna inriktningen av verksamheten på avfallsområdet. DOE och Ministry of Agriculture, Fisheries and Food (MAFF) fastlägger gränsvärden och ger utsläppstillstånd. Ministry of Defense har ansvaret för avfallet som produceras inom det militära programmet. Nuclear Installations Inspectorate (NII) är den tillståndsgivande myndigheten. RWMAC (Radioactive Waste Management Advisory Committee) är ett rådgivande expertorgan till regeringen. National Radiological Protection Board (NRPB) är ett rådgivande organ till regeringen och utför bl a säkerhetsanalyser.

Forsknings- och utvecklingsarbetet på avfallsområdet utförs till stor del av UKAEA (United Kingdom Atomic Energy Authority), BGS (British Geological Survey) och NIREX (Nuclear Industry Radioactive Waste Executive), det senare främst då det gäller låg- och medelaktivt avfall. NIREX bildades av BNFL (British Nuclear Fuels Ltd), UKAEA samt kraftföretagen CEBG och SSEB. I slutet av 1985 ombildades det till ett privat bolag under namnet U.K. NIREX. Delägarna är desamma som tidigare /2.2.5.4/.

Då det gäller deponering av fast radioaktivt avfall har NRPB i en rapport från 1983 angivit vissa allmänna principer och rekommenderat risknivåer som ej bör överskridas /2.2.5.5/. En sammanfattning av NRBP:s arbete rörande flytande och fast avfall publicerades 1985 /2.2.5.6/.

Kärnavfallsprogram

Den brittiska strategin rörande använt kärnbränsle och radioaktivt avfall är följande:

- upparbetning av utbränt bränsle,
- återföring av utvunnet plutonium till snabbreaktorer eller för andra ändamål,
- förglasning av högaktivt avfall (enligt den franska AVM-metoden),
- långtidslagring av det förglasade avfallet (deponeringen skjuts på framtiden),
- marknedgrävning eller havsdumpning av lågaktivt avfall och kortlivat medelaktivt avfall,
- deponering av långlivat medelaktivt avfall i relativt ytnära förvar.

Vid Sellafield pågår dels en ganska genomgripande om- och tillbyggnad av de befintliga upparbetningsanläggningarna, dels uppförandet av en helt ny anläggning för upparbetning av oxidbränsle, THORP (Thermal Oxide Reprocessing Plant).

Nya lagringsbassänger har byggts för såväl Magnox-bränsle (uranmetall) som för oxidbränsle från AGR-reaktorerna. En ny, effektivare behandlingsanläggning för flytande avfall skall kraftigt reducera de radioaktiva utsläppen till omgivningen. Ny utrustning för avkapsling av Magnox-bränsle installeras. En förglasningsanläggning med två processlinjer, baserad på den franska AVM-metoden, är under uppförande och beräknas kunna tas i drift 1989 /2.2.5.7/. En inaktiv anläggning för fullskaleförsök har varit i drift sedan 1983.

Det största projektet vid Sellafield är dock THORP /2.2.5.8/. Den anläggningen skall upparbeta anrikat oxidbränsle från AGR-reaktorer och från lättvattenreaktorer. Två lagringsbassänger, vardera med kapaciteten 1 000 ton uran, är under byggnad. Hela den nya upparbetningsanläggningen skall enligt nuvarande planer stå klar 1990 och kunna börja köra aktivt 1991. Den byggs för kapaciteten 1 200 ton/år.

Det förglasade högaktiva avfallet i 150 l stålbehållare kommer att lagras i minst 50 år före deponering. En lagringsanläggning för 8 000 behållare, uppförs i anslutning till den ovan nämnda förglasningsanläggningen /2.2.5.9/. Behållarna kyls med luft (naturlig konvektion). Kapaciteten täcker behovet fram till år 2000.

Före deponeringen räknar man med att förse avfallskollin med en yttre kapsel. Man har undersökt två alternativ:

- en relativt tunn kapsel av mycket korrosionsbeständigt material såsom titan- eller nickellegeringar,
- en mera tjockväggig kapsel i ett billigare, mindre korrosionsbeständigt material såsom stål eller gjutjärn.

Den brittiska regeringens policydeklaration 1982 rörande deponering av högaktivt avfall har medfört att de tidigare fältundersökningarna, som huvudsakligen var inriktade på förläggning av förvaret i granit, praktiskt taget har upphört /2.2.5.10/.

NIREX (Nuclear Industry Radioactive Waste Executive) undersöker flera nya platser för deponering av låg- och medelaktivt avfall. Marknedgrävning är aktuell för lågaktivt avfall och för kortlivat medelaktivt avfall, medan deponering på större djup skall användas för långlivat medelaktivt avfall.

En potentiell plats för marknedgrävning, som flera undersöks, är Elstow vid Bedford i mellersta England /2.2.5.11/. De där befintliga lerlagren anses lämpliga. I början av 1986 beslöt NIREX att förutom i Elstow utföra undersökningar vid ytterligare tre platser: Bradwell i Essex, Fulbeck i Lincolnshire och Killingholme söder om Humberviken /2.2.5.12/. För deponering av långlivat medelaktivt avfall har man övervägt att använda en gammal gruva i Billingham vid Cleveland där man tidigare brutit anhydrit. Gruvgångarna ligger på 140 – 250 m djup. Detta alternativ har dock övergivits på grund av stark lokal opposition /2.2.5.13/.

DOE (Department of the Environment) har tagit initiativet till en pågående studie, som skall jämföra deponering på land och i havet.

Storbritannien deltar också mycket aktivt i OECD/NEAs internationella program rörande deponering under havsbotten. Det råder dock viss tveksamhet om det skall visa sig politiskt möjligt att utnyttja detta alternativ, även om de tekniska resultaten hittills varit lovande /2.2.5.14/.

2.2.6 EG-länderna

Inom ramen för EG-samarbetet pågår ett omfattande forsknings- och utvecklingsarbete rörande hantering av radioaktivt avfall. Arbetet utförs dels vid laboratorier i de olika länderna, dels vid den gemensamma forskningsstationen vid Ispra i Italien. Resultaten från den andra femårsperioden (1980-1984) presenterades vid en konferens i Luxemburg i april 1985 /2.2.6.1/. Bland de projekt, som fortsätter även under den innevarande femårsperioden, kan följande nämnas:

- MIRAGE (Migration of Radionuclides in the Geosphere) som behandlar radionuklidens kemi och migration i olika geologiska media).
- PAGIS (Performance Assessment of Geological Isolation Systems) som gäller utvecklandet av en metodik för säkerhetsanalys och tillämpning av denna på potentiella förläggningsplatser för slutförvar. Lera, granit, salt och sediment på havsbotten är de typer av formationer, som är aktuella.

Försök skall under de kommande åren utföras i pilotanläggningar:

- i saltgruvan i Asse, Västtyskland,
- i lerlager vid Mol i Belgien,
- i en geologisk formation i Frankrike.

2.2.7 Schweiz

Kärnkraftprogram

De fem lättvattenreaktorer som är i drift i Schweiz har sammanlagt en kapacitet på 3.0 GWe och ytterligare ca 2 GWe är beställda. /2.2.7.1/ Kärnkraften svarade 1984 för 35% av elproduktionen /2.2.7.2/. Denna siffror väntas stiga till över 40% omkring år 2000. Drygt 500 ton använt kärnbränsle har hittills producerats och siffran beräknas stiga till ca 2 000 ton år 2000.

Dagens hantering av kärnavfallet

Använt kärnbränsle lagras i bassänger vid reaktorstationerna.

De schweiziska kraftföretagen har kontrakt med COGEMA i Frankrike och med BNFL i Storbritannien om upparbetning av använt kärnbränsle. Kontrakten omfattar utbränt bränsle fram till omkring 1990. Förglasat högaktivt avfall från upparbetningen kan sändas tillbaka till Schweiz för deponering.

Lågaktivt avfall från reaktordriften behandlas vid reaktorstationerna och vid EIR (Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung) i Würenlingen. Industrikoncentrat och slam gjuts in i cement eller bitumen; använda jonbytarmassor i polystyren; askor och slagg från förbränningen i cement, liksom metallavfall /2.2.7.3/. Behandlat avfall lagras i plåtfat på platsen.

Lagstiftning på kärnavfallsområdet

Enligt den nu gällande atomenergilagen (Atomgesetz) från 1979 skall kärnkraftföretagen lägga fram en plan för slutförvaring av radioaktivt avfall på ett tillfredsställande säkert sätt. Detta är en förutsättning för att de skall få driva kärnkraftverken efter 31 december 1985.

Den schweiziska staten och kärnkraftföretagen har gemensamt bildat NAGRA (Nationale Genossenschaft für die Lagerung Radioaktiver Abfälle) för att ta hand om det radioaktiva avfallet. NAGRAs avfallsplaner skall godkännas av KSA (Kommission für die Sicherheit von Atomanlagen) och ASK (Abteilung für die Sicherheit der Kernanlagen) inom energidepartementet. En stor del av NAGRAs forsknings- och utvecklingsprogram utföres av EIR (Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung) på kontrakt.

KSA och ASK gav 1980 ut allmänna riktlinjer för slutförvaring av radioaktivt avfall /2.2.7.4/. Enligt dessa riktlinjer får individdosen till följd av frigörelse av aktivitet från förvaret inte överskrida 0,1 mSv per år. Dosen skall reduceras så långt det är praktiskt möjligt (ALARA-principen – "As Low As Reasonably Achievable").

Kärnavfallsprogram

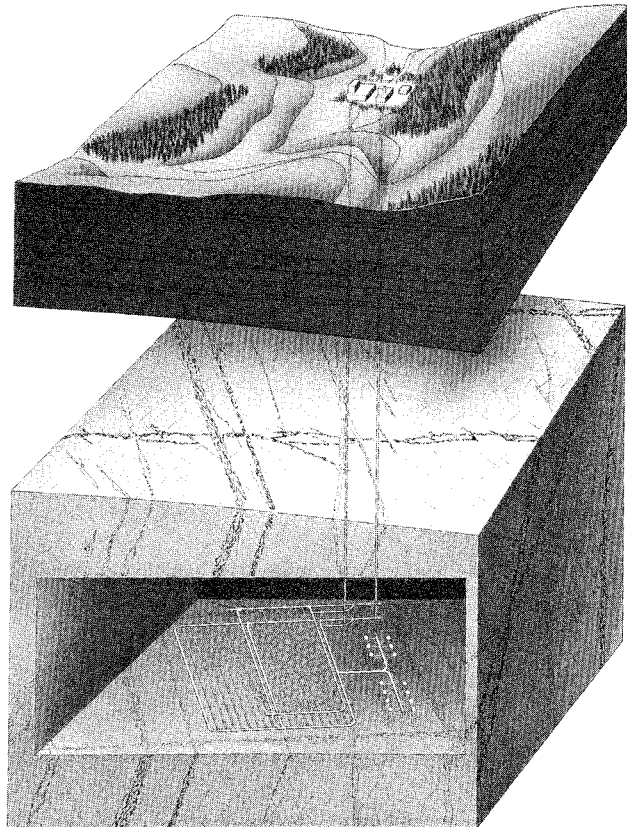
Huvudalternativet i den schweiziska bränslecykelstrategin är upparbetning av använt kärnbränsle utomlands och deponering av förglasat högaktivt avfall inom landet. Vissa insatser görs dock även rörande direktdeponering av använt bränsle. Förglasat avfall, som väntas börja sändas tillbaka till Schweiz i mitten av 1990-talet, skall lagras ett antal decennier (40 år) före deponering.

Den plan för slutförvaring, som kraftföretagen enligt den schweiziska atomenergilagen är skyldiga att framlägga för att fortsättningsvis få driva reaktorerna, publicerades av NAGRA i början av 1985 /2.2.7.5/. Man förutser i utredningen två typer av slutförvar:

- ett för låg- och medelaktivt avfall,
- ett för högaktiva avfall och vissa medelaktiva alfa-avfall.

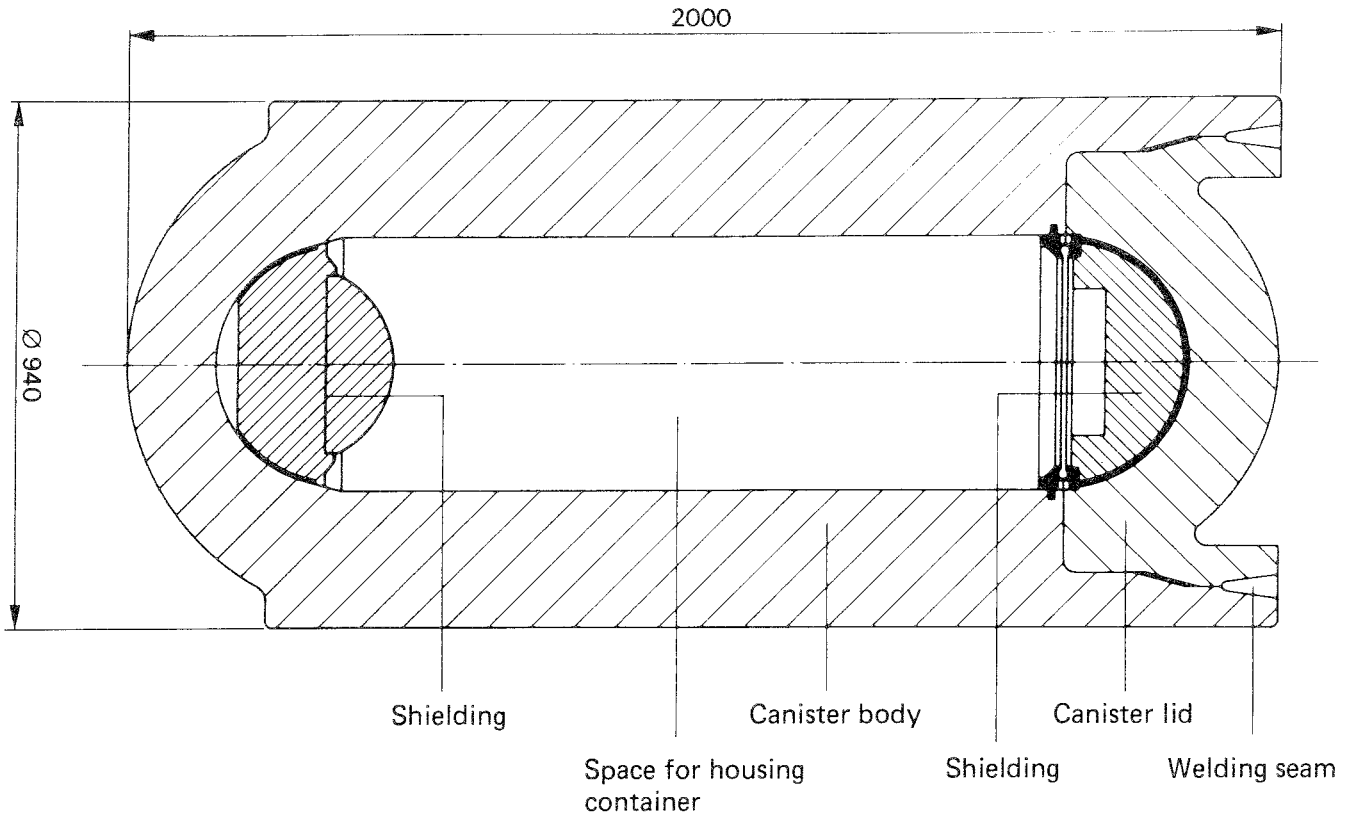
Det låg- och medelaktiva avfallet placeras, ingjutet i cement eller i asfalt, i underjordiska silos på minst 750 m djup. Det högaktiva avfallet och vissa alfaavfall läggs i ett förvar i granit på ca 1 200 m djup, Figur 2.2.7.1 och 2.2.7.2. Huvudalternativet i utredningen är upparbetning av använt kärnbränsle (7 860 ton) och förglasning av det högaktiva avfallet. Direktdeponering av använt kärnbränsle diskuteras enbart i ett kortare avsnitt.

Det förglasade högaktiva avfallet innesluts i stålbehållare som omges av tätpackad bentonit, se Figur 2.2.7.3. Man har ej behandlat en specifik förläggingsplats, men valt förhållanden, som är aktuella i ett område i norra Schweiz, där graniten överlagras av sedimentära bergarter, se Figur 2.2.7.4. Säkerhetsanalysen uppvisade mycket låga doser till befolkningen i omgivningen.



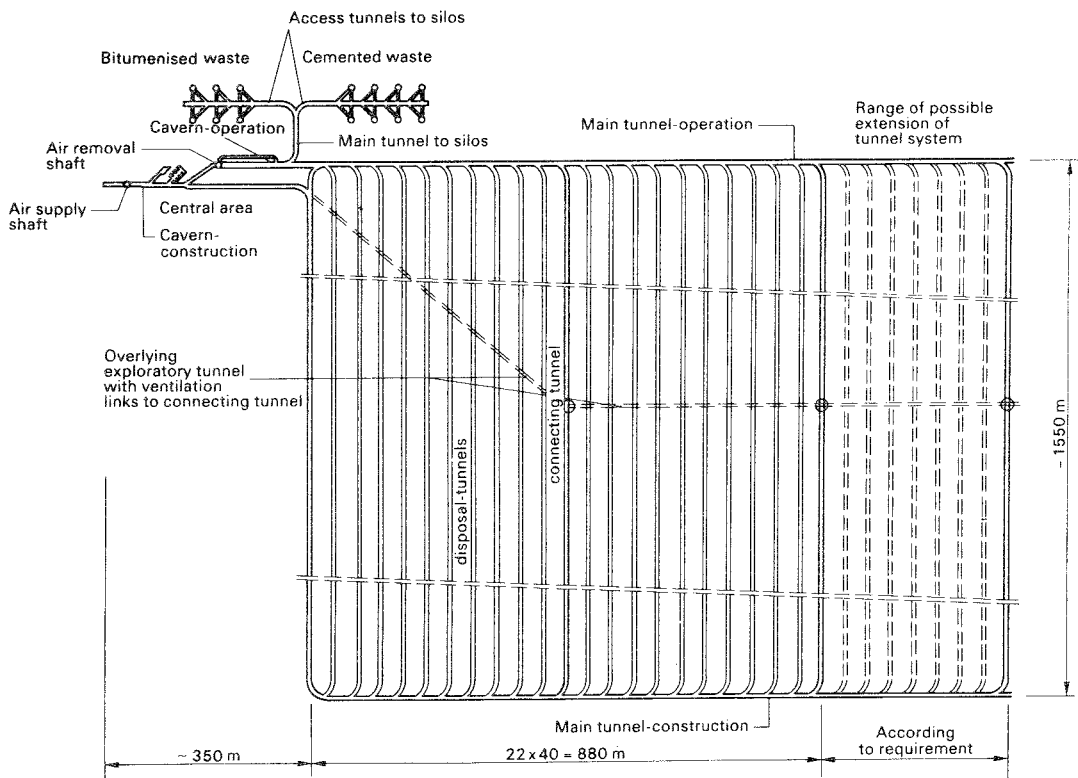
Figur 2.2.7.1. Perspective overview of type C repository installations. Example of arrangement on two levels in a fissured granite block according to the model data-set.

Hämtad ur: Project Gewähr 1985 NAGRA Project Report NGB 85-09, juni 1985.



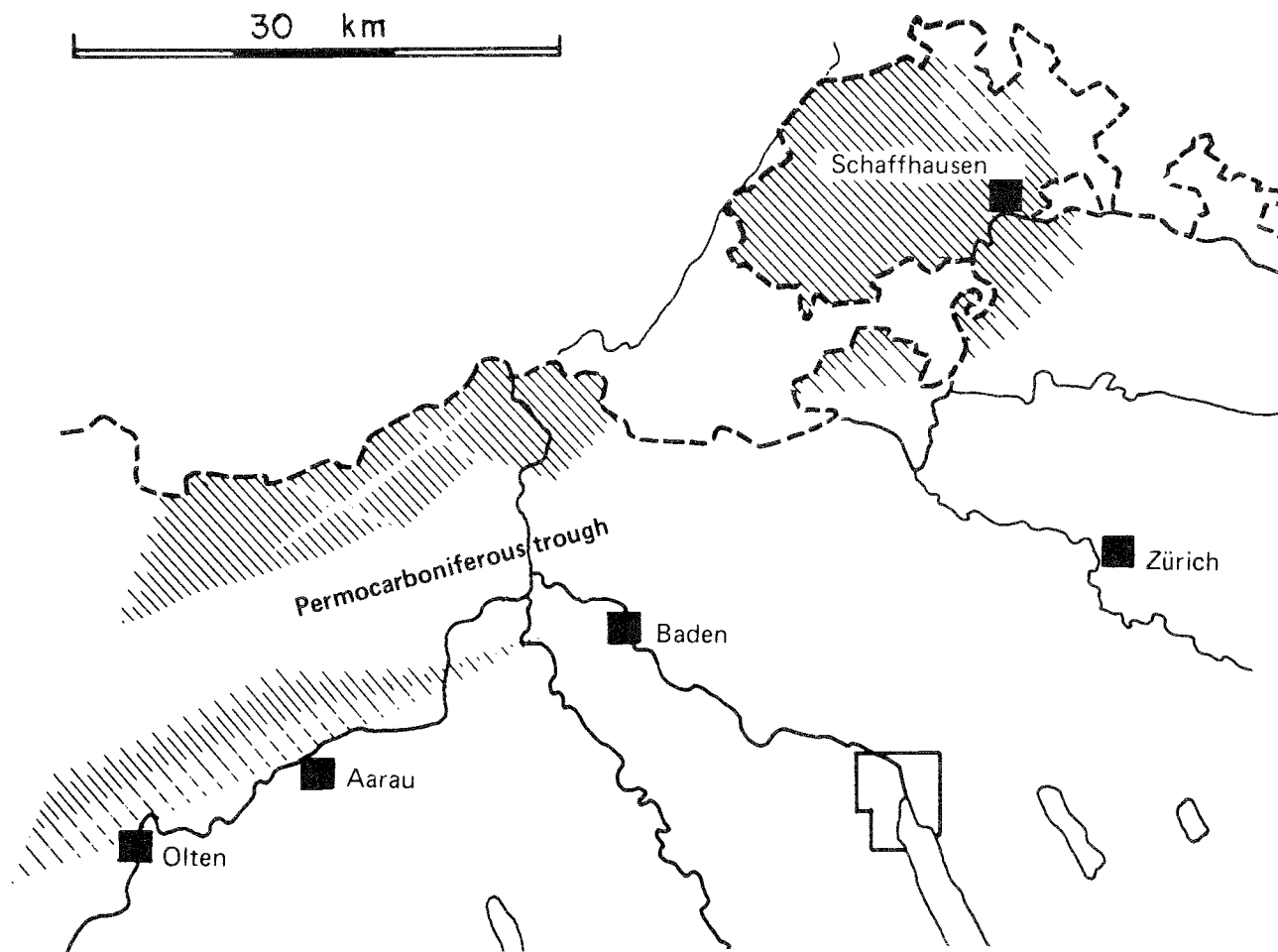
Figur 2.2.7.2. Schematic representation of disposal container for vitrified HLW.

Hämtad ur: Project Gewähr 1985 NAGRA Project Report NGB 85-09, juni 1985.



Figur 2.2.7.3. Schematic lay-out of repository area. Arrangement can be adapted to the specific geometric structure of the host rock in the repository zone.

Hämtad ur: Project Gewähr 1985 NAGRA Project Report NGB 85-09, juni 1985.



Figur 2.2.7.4. Overview map with potential siting regions for a type C repository in the region of investigation in northern Switzerland for the repository concept in Project Gewähr 1985 (there are other potential regions for host rocks other than crystalline and other construction concepts).

Hämtad ur: Project Gewähr 1985 NAGRA Project Report NGB 85-09, juni 1985.

Några huvudpunkter i de nuvarande planerna för slutförvaret är följande /2.2.7.6/:

- 1987-88 sammanfattning och utvärdering av de regionala undersökningarna.
- 1988-1995 detaljundersökning av en eller flera potentiella förlägningsplatser.
- 1995-2010 sänkning av provschakt.
- 2020 idrifttagning av förvaret.

I det fortsatta utvecklingsarbetet intar det underjordiska berglaboratoriet, i en granitformation vid Grimsel i Alperna, en central plats. Omfattande försök skall där utföras rörande bl a berghållfasthet, tektonik, hydrologi och migration.

Ett förvar för låg- och medelaktivt avfall planeras bli färdigställt under 1990-talet. Man har beslutat att provborrningar skall utföras vid tre potentiella förlägningsplatser (Bois de la Galivaz, Oberbauenstock och Piz Pian Grand) /2.2.7.7/.

I väntan på detta förvar beslutades i början av 1985 att ett mellanlager skulle byggas vid Würenlingen så snart som möjligt.

2.2.8 Finland

Kärnkraftsprogram

Fyra lättvattenreaktorer med den sammanlagda kapaciteten 2.3 GWe är i drift i Finland. Kärnkraften svarade 1984 för ca 41% av elproduktionen.

Dagens hantering av kärnavfallet /2.2.8.1, 2.2.8.2/

Använt kärnbränsle lagras i bassänger vid reaktorstationerna. I slutet av 1984 lagrades sammanlagt ca 300 ton utbränt bränsle i bassängerna vid de båda stationerna. Använt bränsle från de sovjetbyggda reaktorerna vid Loviisa skall återsändas till Sovjetunionen. En del transporter har redan genomförts.

Det radioaktiva avfallet från driften av reaktorerna vid Loviisa lagras tills vidare vid stationen. Ingjutning i cement kommer eventuellt att användas. Vid Olkiluoto gjuts indunstat avfall in i bitumen i plåtfat och lagras på platsen.

Ansvarsfördelning och lagstiftning på kärnavfallsområdet

Den finska atomenergikommissionen är en del av energiavdelningen inom handels- och industridepartementet. Den övervakar verksamheten på kärnenergiområdet.

Ansvar för hanteringen av radioaktivt avfall, liksom kostnader, åvilar den som producerar avfallet. Enligt den principdeklaration, som regeringen antog 1983, skall kärnkraftföretagen i första hand söka uppnå sådana överenskommelser att använt bränsle skickas utomlands för gott. Om detta inte är möjligt, måste kraftföretagen ordna den slutliga deponeringen på ett tillfredsställande sätt inom landet. Använt bränsle lagras i så fall före deponeringen, som beräknas kunna påbörjas omkring år 2020. Platsvalet skall dock ske senast i slutet av år 2000 /2.2.8.3/. De båda kärnkraftbolagen, TVO (Teollisuuden Voima Oy) och IVO (Imatran Voima Oy) har gemensamt bildat ett organ YJT (Voimayhtiöiden Ydinjätetoimikunta) som skall samordna forsknings- och utvecklingsinsatserna rörande radioaktivt avfall.

Kärnavfallsprogram

Ett mellanlager för använt kärnbränsle är under byggnad vid Olkiluoto. Det beräknas kunna tas i drift i slutet av 1987. Detta mellanlager medför att besluten om den slutliga hanteringen av det använda kärnbränslet inte behöver fattas förrän om flera decennier. Huvudalternativen för detta bränsle är uppberedning utomlands eller direktdeponering i ett djupförvar i berggrunden. Enligt den nu aktuella planen för direktdeponering skulle huvuddragen vara följande:

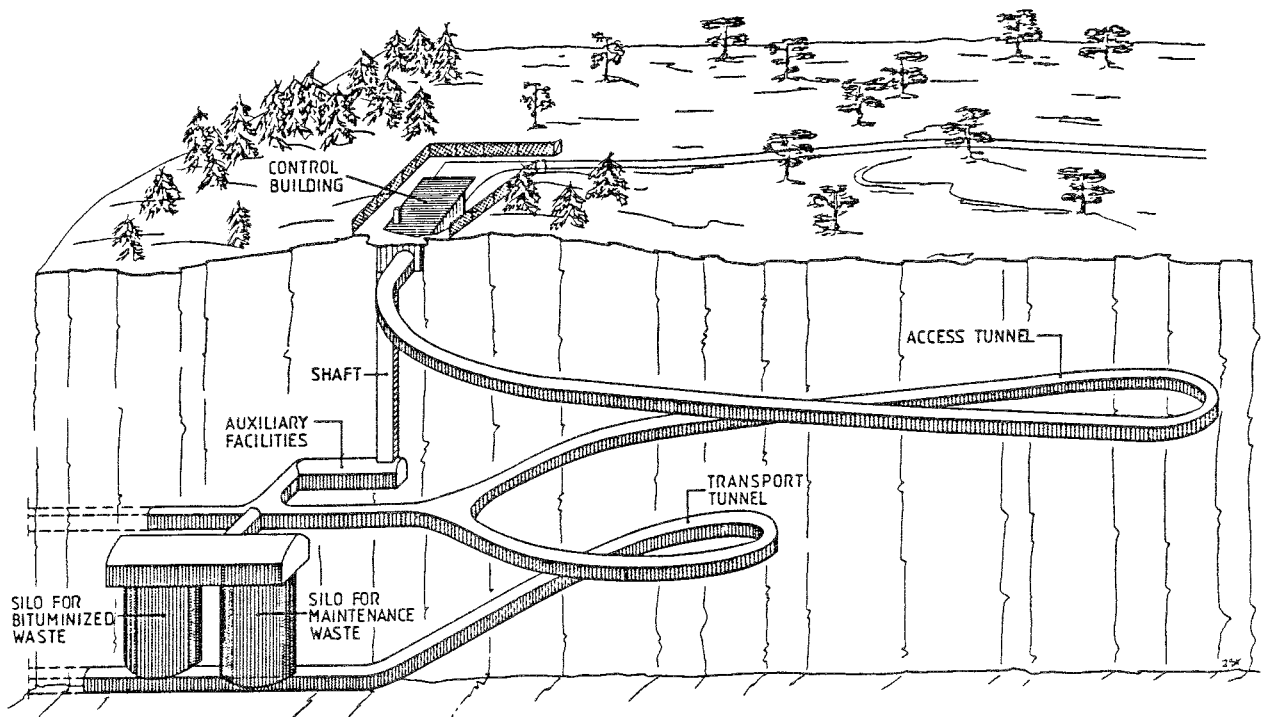
- Under perioden 1986-92 utförs orienterade platsundersökningar inom 5-10 områden /2.2.8.4/.
- 1993-2000 utförs detaljerade undersökningar inom två till tre områden.
- År 2000 görs det slutliga platsvalet, följt av ytterligare undersökningar.
- 2010 skall arbetet ha framskridit så långt att ansökningshandlingarna kan lämnas in till de tillståndsgivande myndigheterna för ett slutförvar med tillhörande inkapslingsstation.

För deponering av låg- och medelaktivt avfall planeras underjordiska förvar vid Loviisa och vid Olkiluoto, se Figur 2.2.8.1. Ansökningshandlingarna, inklusive preliminära säkerhetsanalyser, skall inlämnas till myndigheterna i slutet av 1986. Förvaren är utsprängda i berggrunden 50-100 m under markytan. De skall senare kunna utvidgas för att även ta emot avfall från rivning av reaktorer. Enligt föreliggande tidsplaner skulle förvaren kunna tas i drift 1992.

2.2.9 Japan

Kärnkraftprogram

Japans kraftiga importberoende när det gäller energiråvaror har medfört att landet satsat mycket ambitiöst på kärnkraft. Ca 25 GWe är i drift och ytterligare ca 11 GWe är under byggnad eller har beställts /2.2.9.1/. Kärnkraften svarar för ca 24% av elproduktionen i landet. Man räknar med att ca 62 GWe kärnkraft skall vara i drift omkring år 2000 och då producera ca 39% av elbehovet /2.2.9.2/. Vid sidan av lättvattenreaktorer, som helt dominerar f n, utvecklas också avancerade termiska reaktorer och snabba brydreaktorer.



Figur 2.2.8.1. The planned repository for reactor waste at Olkiluoto.

Hämtad ur: Annual Report 1984. Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies (YJT), juni 1985.

Dagens hantering av kärnavfallet

Den totala mängden använt kärnbränsle, som producerats i Japan, uppgår till ca 4 500 ton /2.2.9.3/.

Använt kärnbränsle lagras i vattenbassänger vid reaktorstationerna. I en mindre anläggning vid Tokai Mura torrlagras en del lågutbränt uranmetallbränsle från försöksreaktorer.

Upparbetningsanläggningen vid Tokai Mura, som startades 1977 och som har en nominell kapacitet på 0.7 t/d, räcker ej till för upparbetning av använt kärnbränsle. Hittills har endast ca 200 ton upparbetats /2.2.9.4/. De japanska kraftföretagen har därför slutit kontrakt på upparbetning av ca 4 600 ton använt bränsle i utländska upparbetningsanläggningar (Sellafield i Storbritannien och La Hague i Frankrike). Avfallet från upparbetningen skall enligt kontrakten återsändas till Japan.

I början av 1985 uppgick mängden flytande högaktivt avfall vid Tokai Mura till ca 170 m³ /2.2.9.5/.

Lågaktivt avfall uppkommer vid drift av reaktorerna som f n uppgår till 34 st, vid 4 bränslefabriker, i upparbetningen och vid en pilotanläggning för uranisotopanrikning. Dessutom produceras lågaktivt avfall vid forskningsstationer och sjukhus. Behandlingen av avfall från forskningsinstitut och sjukhus sker centralt, medan varje reaktorstation behandlar sitt avfall. Vid behandling av flytande avfall används indunstning och ingjutning av koncentratet i cement eller bitumen. Även ingjutning i plast prövas. Fast avfall kompakteras eller bränns, då så är lämpligt, varpå ingjutning sker i cement, bitumen eller plast.

Det behandlade avfallet lagras, vanligen i 200-l-fat, på platsen i väntan på deponering. I början av 1985 uppgick antalet fat till ca 600 000. /2.2.9.6/ 1990 beräknas lagret av fat överstiga 10⁶ st /2.2.9.7/. Mindre mängder lågaktivt avfall har tidigare dumpats i havet.

Ansvarsfördelning och lagstiftning på kärnavfallsområdet

Den japanska regeringen har ansvaret för deponering av radioaktivt avfall. Kostnaden för den slutliga förvaringen skall bäras av kärnkraftindustrin. En expertkommitté har dock rekommenderat att ansvaret för slutförvaring av lågaktivt avfall skall bäras av det företag som genomför deponeringar /2.2.9.8/.

JAEC (Japan Atomic Energy Commission) har det övergripande ansvaret för genomförande av avfallsprogrammet. Forskning och utveckling utförs av tre organisationer:

- PNC (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) då det gäller bränslecykeln,
- CRIEPI (Central Research Institute of Electric Power Industry) inriktar sig främst på avfall, som kommer tillbaka från utlandet (exempelvis från upparbetning i Storbritannien och Frankrike),
- JAERI (Japan Atomic Energy Research Institute) tar hand om säkerhetsfrågor.

Alla tre organisationerna rapporterar till premiärministern genom STA (Science and Technology Agency).

Verksamheten rörande lågaktivt avfall samordnas

av RWMC (Radioactive Waste Management Center), som bildats av kraftbolagen, vissa kärnkraftindustrier och forskningsinstitutioner.

NSC (Nuclear Safety Commission) med dess Special Committee on Safety of Radioactive Waste, har ansvaret för regleringen på området.

Kärnavfallsprogram

De kända inhemska uranfyndigheterna i Japan är små. För att minska beroendet av utlandet går därför den japanska bränslecykelpolicyn ut på att upparbeta använt kärnbränsle och återföra därvid utvunnet uran och plutonium. Återföringen skall till att börja med ske i termiska reaktorer och på längre sikt i snabba bldreaktorer.

En större upparbetningsanläggning (800 ton/år) skall byggas och drivas av ett konsortium på ett 100-tal bolag, JNFS (Japan Nuclear Fuel Service). Anläggningen beräknas kunna komma igång omkring 1995 vid Rokkashomura på norra Honshu. För den nya anläggningen kommer erfarenheter från den mindre upparbetningsfabriken vid Tokai Mura att ha stor betydelse. Omfattande utvecklingsarbete pågår vid Tokai Mura, bl a har man byggt några heta celler för förglasning av högaktivt avfall och en linje där upparbetning av snabbreaktorbränsle studeras. En pilotanläggning för förglasning beräknas stå färdig 1991 och en pilotanläggning med en kapacitet på ca 120 kg/d snabbreaktorbränsle planeras också för idrifttagning omkring 1991. Vid Tokai Mura planeras också en speciell anläggning för att behandla transuranavfall, PWTF (Plutonium Waste Treatment Facility). Processen innebär behandling med stark syra, förbränning och förslagning.

I anslutning till den nya upparbetningsanläggningen planeras ett centralt lager för använt bränsle med en startkapacitet på ca 3 000 ton. Idrifttagning beräknas ske omkring 1991.

Det högaktiva avfallet skall solidifieras och långtidslagras i luftkylda utrymmen. Ett lager skall byggas vid Rokkashomura för solidifierat högaktivt avfall från såväl inhemska som utländska upparbetning av japanskt använt bränsle.

Preliminära geologiska undersökningar har identifierat potentiellt lämpliga slutförvaringsplatser för högaktivt avfall i granit-, basalt, tuff- och skifferformationer. I det fortsatta arbetet räknar man också med att bygga en underjordisk försöksanläggning i en potentiellt lämplig formation för att bl a studera effektiviteten hos de olika barriärerna. En plats som diskuterats är Horonobe på norra Hokkaido. Den fullstora anläggningen för slutförvaring väntas inte tas i drift förrän efter år 2015.

Japan deltar också i OECD/NEAs utvecklingsprogram rörande deponering under havsbotten (sub-seabed disposal).

Man har planer på att vid Rokkashomura också bygga ett centralt lager för behandlat lågaktivt avfall. Driften beräknas komma igång i början av 1990-talet. Ett privat bolag, JNFI (Japan Nuclear Fuel Industries Company Inc.) skall sköta driften av anläggningen.

JNFI, skall också driva en uranisotop-anrikningsfabrik på platsen /2.2.9.9/.

Slutförvaringsmetod för lågaktivt avfall är ej fastlagd. Såväl havsdumpning som slutförvaring på land studeras parallellt.

2.2.10 Övriga länder

BELGIEN

Kärnkraftprogram

Inom Belgien är 7 kraftreaktorer i drift med den totala kapaciteten 5.5 GWe /2.2.10.1/. 1985 svarade kärnkraft för ca 58% av elproduktionen /2.2.10.2/. Belgien är också delägare i Chooz-reaktorn i Frankrike och i de ytterligare två enheter som planeras där. Tillsammans med Holland och Västtyskland deltar Belgien också i den snabba prototypreaktorn vid Kalkar (SNR-300) i Tyskland.

Dagens hantering av kärnavfallet

Använt kärnbränsle lagras i bassänger vid reaktorstationerna. Belgiska kraftföretag har uppbyggnadskontrakt med COGEMA på 540 ton. Avfall från uppbyggnaden i Frankrike kan komma att sändas tillbaka till Belgien efter 1990.

Vid uppbyggnadsanläggningen i Mol, som tidigare drevs av Eurochemic men som sedan 1985 ägs av Belgoprocess Company, lagras det högaktiva avfallet i rostfria tankar (ca 900 m³). En tysk pilotanläggning för förglasning av högaktivt avfall enligt det s k PAMELA-förfarandet (Pilotanlage Mol zur Erzeugung Lagerfähiger Abfälle) har uppförts och tagits i drift vid Mol /2.2.10.3, 2.2.10.4/.

Eurochemic drev under perioden 1978-1984 en anläggning för behandling och bitumeningjutning av medelaktivt avfall från olika steg i uppbyggnaden. Vid uppbyggnadsfabriken i Mol finns också en våtförbränningsanläggning för plutoniumhaltigt avfall.

Belgoprocess Company är ett dotterbolag till Synatom, som ägs till 50% av belgiska staten, och till 50% av kraftföretag. Ombyggnad av den gamla uppbyggnadsanläggningen och idrifttagning på nytt diskuteras /2.2.10.5/.

Flytande lågaktivt avfall från driften av de belgiska reaktorerna indunstas och gjuts in i cement vid stationerna. Fast avfall skickas till Mol för förbränning eller ingjutning i cement eller bitumen.

En del lågaktivt avfall dumpades tidigare i havet. Denna verksamhet upphörde dock 1982.

Ansvarsfördelning och lagstiftning på kärnavfallsområdet

Den långsiktiga planeringen för behandling, transport, lagring och deponering av radioaktivt avfall åvilar NIRAS/ONDRAF (flamländsk resp fransk akronym). Det mesta forsknings- och utvecklingsarbetet utförs av SCK/CEN (Studiecentrum voor Kernenergie/Centre d'étude de l'Énergie Nucléaire) vid Mol.

SPAIR (Services for Protection Against Ionizing Radiation), som lyder under Hälsoministeriet och NSS (Nuclear Safety Service) under Arbetsmarknadsdepartementet är de övervakande myndigheterna.

Kärnavfallsprogram

Det högaktiva avfallet från uppbyggnad kommer att förglasas och efter en lagringstid på 50 år deponeras i ett underjordiskt förvar. Det är lerlager vid Mol (Boom-formationen) som man koncentrerat intresset på då det gäller placering av ett slutförvar för högaktivt avfall /2.2.10.6/. I samarbete med Euratom har man byggt ett underjordiskt laboratorium på drygt 200 m djup i Boom-formationen. Man skall där undersöka följande /2.2.10.7/:

- korrosion av olika lagringsmaterial och det förglasade avfallet,
- migration av radionuklider i lera,
- hydrologin i och omkring lerformationen,
- geotekniska frågor av intresse vid byggandet av förvaret,
- utformningen av förvaret,
- buffert- och återfyllnadsmaterial.

Man har för avsikt att längre fram göra försöksdeponeringar av förglasat högaktivt avfall och av plutoniumhaltigt avfall. En preliminär säkerhetsanalys över slutförvaring i lerlagren vid Mol skall avlämnas 1988 /2.2.10.8/.

Belgien har för avsikt att delta i OECD/NEAs studier rörande deponering under havsbotten.

Lågaktivt avfall lagras vid Mol. Ett större centralt lager planeras på platsen. Man räknar med att det skall kunna börja användas 1987. Deponeringen av lågaktivt avfall kommer antingen att ske i ett förvar på land eller genom havsdumpning /2.2.10.9/.

SPANIEN

Kärnkraftprogram

Den installerade kärnkraften i Spanien uppgår till 5.8 GWe (8 kraftreaktorer) och ytterligare 3.9 GWe är under byggnad /2.2.10.10/. 1984 svarade kärnkraften för ca 20% av elproduktionen /2.2.10.11/.

Enligt den nu gällande energiplanen för landet skall den installerade kärnkraftseffekten begränsas till 7.7 GWe år 1990 /2.2.10.12/.

Alla kraftreaktorer, utom den första gaskylda grafitreaktorn vid Vandellos, är lättvattenreaktorer.

Dagens hantering av kärnavfallet

Använt kärnbränsle lagras i vattenbassänger vid reaktorstationerna. Utbrända element från den gaskylda grafitreaktorn vid Vandellos uppbyggnadsarbetas i Frankrike, och vissa mängder lättvattenbränsle har kontrakterats för uppbyggnad i Sellafeld-anläggningen i Storbritannien.

Reaktoravfall gjuts in i cement vid reaktorstationerna /2.2.10.13/. Tunnor med lågaktivt avfall lagras i en övergiven järngruva i Sierra Morena.

Ansvarsfördelning och lagstiftning på kärnavfallsområdet

Den spanska regeringen kontrollerar verksamheten på kärnenergiområdet genom:

- JEN (Junta de Energia Nuclear), som huvudsakligen är en forskningsutvecklingsorganisation,

- ENUSA (Empresa Nacional del Uranio S.A.) är verksam inom bränslecykeln före reaktorn,
- ENRESA (Empresa Nacional de Residuos Radioactivos S.A.) svarar för hanteringen av radioaktivt avfall, inklusive använt kärnbränsle,
- CSM (Consejo de Seguridad Nuclear) är tillståndsgivande och övervakande organ.

Kärnavfallsprogram

Spanien har övergivit tidigare planer på att bygga uppberedningsanläggning inom landet. Man inriktar sig enligt nuvarande planer på direktdeponering i saltlager eller i granit.

Använt bränsle skall före deponeringen torrlagras i ett centrallager, antingen i anslutning till slutförvaret eller vid en reaktorstation.

ITALIEN

Kärnkraftprogram

Italien har för närvarande tre reaktorer i drift med den totala kapaciteten 1.3 GWe (en gaskyld grafitmodererad reaktor vid Latina, en PWR vid Trino Vercellese och en BWR vid Caorso) /2.2.10.14/. Kärnkraft svarade 1984 för 3.8% av elproduktionen /2.2.10.15/. Ytterligare två reaktorer (BWR-reaktorer) på sammanlagt ca 2 GWe är under byggnad vid Montalto di Castro, 130 km norr om Rom.

Kärnkraftutbyggnaden har inte alls fått den omfattning, som man räknade med i mitten av 70-talet.

Dagens hantering av kärnavfall

Bränsle från den gaskylda Latina-reaktorn uppbereddas i Storbritannien och högaktivt avfall från processen kommer att sändas tillbaka till Italien efter förglasning /2.2.10.16/.

Vid de båda lättvattenreaktorerna lagras använt bränsle i bassänger.

Två pilotanläggningar för uppberedning har varit i drift sedan lång tid tillbaka, dels EUREX-anläggningen vid Saluggia utanför Turin, dels ITREC-anläggningen i Trisaia i Syditalien. Den förra har bl a behandlat mindre mängder CANDU-bränsle. Ombyggnad skall göra pilotanläggningen lämpad även för oxidbränsle med högre utbränning, exempelvis från lättvattenreaktorerna vid Trino Vercellese. Vid ITREC har man uppberedat toriumhaltigt bränsle och blandoxidbränsle /2.2.10.17/.

Avfall från driften av reaktorerna kompakteras där så är möjligt, och använda jonbytarmassor, slam och indunstarkoncentrat gjuts in i cement i behållare. Vid Caorso används ingjutning i urea-formaldehyd. Det på detta sätt behandlade avfallet lagras t v vid reaktorstationerna /2.2.10.18/.

Ansvarsfördelning och lagstiftning

En central roll spelas av ENEA /2.2.10.19/. ENEA ersatte 1982 CNEN, som enbart befattade sig med kärnkraft, och den nya organisationen har fått ett vidgat ansvarsområde som även omfattar förnyelsebara kraftkällor och energisparande. Säkerhetsfrågor

handhas av DISP (Direzione Sicurezza Nucleare Protezione Sanitaria), som lyder under ENEA.

NUCLECO, som ägs av ENEA och AGIP (bränslecykelbolaget), har ansvaret för hantering och omhändertagande av lågaktivt avfall från reaktorstationer, sjukhus och forskningsinstitutioner.

Kärnavfallsprogram

Uppberedning och återföring av utvunnet plutonium till bredreaktorer är den allmänna policyn på området.

I den nu gällande nationella energiplanen konstateras dock att det inte finns behov av en fullstor uppberedningsanläggning i landet under den kommande 15-årsperioden.

ENEA skall inom kort lägga fram konkreta planer för lagring av det förglasade högaktiva avfall, som kommer att sändas tillbaka till Italien från Storbritannien efter uppberedning. Detta bränsle kommer från Latinareaktorn /2.2.10.16/. Även frågan om ett centralt lager för använt kärnbränsle skall behandlas i förslaget.

Undersökningarna i Italien, rörande slutförvaring av högaktivt avfall, har huvudsakligen inriktats på lerformationer vilka förekommer främst i södra Italien. Salt-formationer är ett annat alternativ /2.2.10.20, 2.2.10.21/. Forsknings- och utvecklingsarbetet har till stor del utförts inom ramen för EG-samarbetet. Hur den slutliga förvaringen av lågaktivt avfall skall gå till har man ännu inte beslutat.

2.3 INTERNATIONELLA PROGRAM

Ett flertal internationella organisationer är involverade i verksamhet rörande hantering av kärnavfall:

- The International Commission on Radiological Protection (ICRP).
- The United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR).
- The International Atomic Energy Agency (IAEA).
- The Commission of the European Communities (CEC).
- The Nuclear Agency of the Organization for Economic Cooperation and Development (NEA-OECD).

Följande beskrivning ger en snabb överblick över omfattning och inriktning av respektive organisations verksamhet.

ICRP grundades redan 1928 och har sedan dess fortlöpande gett ut rekommendationer i strålskyddsfrågor. Dessa rekommendationer utgör basen för såväl nationella gränsvärden som internationella policydokument och föreskrifter av typ "Basic Safety Standards", vilka utges av bl a IAEA, OECD/NEA och Världshälsoorganisationen WHO.

Under juli 1985 utgavs i serien "Annals of the ICRP" publikation nr 46 med titeln "Radiation Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste".

UNSCEAR är en organisation som arbetar i FNs regi och har nära samarbete med ICRP. Organisationen ger ut återkommande rapporter rörande statistik över dosbelastning till olika yrkesgrupper, strålnings-effekter m m.

IAEA bildades år 1956 och är också en organisation inom FN. Syftet med organisationens program för hantering av kärnavfall är att hjälpa medlemsstaterna med tekniskt kunnande och information samt att stödja forskning inom området. Eftersom *IAEA* har begränsade resurser att själva utföra forskning inriktar sig arbetet i huvudsak på att koordinera forskningsprogram i de olika medlemsländerna.

IAEA anordnar årligen ett flertal symposier och konferenser inom kärnavfallsområdet. Man står även till tjänst med viss utbildningsverksamhet och med teknisk expertishjälp om så efterfrågas. Under 1988 avser *IAEA* att publicera ett dokument vilket kommer att ange kriterier för förvaring av högaktivt avfall i berggrund.

CEC arbetar inom området radioaktivt avfall med målsättningen att samordna forskningen mellan sina medlemsländer.

I en rullande 12-årsplan, vilken revideras vart tredje år, ingår bl a följande aktiviteter:

- Att befrämja samarbete mellan medlemsländerna inom området hantering och förvaring av radioaktivt avfall.
- Att befrämja och stödja erforderlig forskning inom området.
- Att fortlöpande bedöma och rapportera forskningsresultat inom området.

Delar av *CEC* forskning utförs vid "ISPRAs Establishment of the Joint Research Center" i norra Italien. Se kapitel 2.2.6.

OECD/NEA är en multinationell organisation som har till mål att stödja och koordinera arbetet inom och mellan sina medlemsländer.

Organisationen publicerar forskningsrapporter, ger ut olika former av policydokument och anordnar symposier och arbetsmöten m m. Organisationen försöker att arbeta inom områden där de enskilda medlemsländerna inte utför regelbunden forskning.

Som exempel på pågående eller i vissa fall genomförda forskningsprojekt kan nämnas:

- Databasen *ISIRS* (International Sorption Information Retrieval System) vilken innehåller geokemiska data.
- Framtagande och fastställande av strålskydds krav vid slutförvaring av radioaktivt avfall.

Exempel: "Long Term Radiation Protection Objectives for Radioactive Waste Disposal" från 1984.

- Sammanställningar angående dagsläget beträffande förvaring av radioaktivt avfall i olika geologiska formationer.

Exempel: "Geological Disposal of Radioactive Waste: An Overview of the Current Status of Understanding and Development" från 1984.

- Modeller för förvaring av högaktivt avfall under havsbotten (Seabed Disposal).

En internationell arbetsgrupp, *SWG* (Seabed Working Group), arbetar med framtagning av kriterier för platsbedömningar, teknologi vid platsundersökningar samt säkerhetsbedömningar.

- Säkerhetsbedömningar vid havsdumpning av lågaktivt avfall.

3 PÅGÅENDE OCH PLANERAD UTLÄNDSK FoU-VERKSAMHET

I det här kapitlet görs en mera detaljerad genomgång av den utländska forsknings- och utvecklingsverksamheten inom olika ämnesområden. Genomgången gör inte anspråk på att vara fullständig, endast den verksamhet som på olika sätt kan ha ett påtagligt intresse för svensk del och för uppläggningsprogram har tagits med.

Kärnavfallsområdet ägnas stor uppmärksamhet i alla kärnkraftländer. Det gör att mycket FoU-arbete som ännu inte har definierats kan komma att påbörjas under de närmaste åren och vara av intresse för svensk del. Det är därför viktigt att ha en flexibel och löpande uppföljning av verksamheten i andra länder. Inte minst spelar de direkta specialistkontakterna inom olika områden en stor roll. Formerna för SKBs löpande uppföljning av utländsk verksamhet och medverkan i internationellt forskningssamarbete beskrivs i Kapitel 4.

3.1 ÖVERSIKT

Totalt genomförs i världen en omfattande verksamhet i form av forskning, utveckling, demonstrationsförsök, platsundersökningar, datasammanställningar etc inom kärnavfallsområdet. Att ur allt detta vaska fram det som är av direkt intresse för det svenska programmet sker som en integrerad del av det dagliga arbetet för de ämnesområdesansvariga på SKBs forskningsavdelning och för de konsulter/expertter som anlitas inom olika fält. Även om delar av andra länders forskningsprogram behandlar geologiska modeller vilka ej är tillämpbara i Sverige, kan ofta direkta paralleller dras angående slutsatser om övergången av radioaktiva ämnen till biosfären.

Nyttan för svensk del av andra länders forskning kan ligga på flera olika plan:

- metod- och modellutveckling,
- vidgat och förstärkt dataunderlag,
- belysning av andra alternativ för förvars-, och barriärutformning, materialval etc,
- validering och förstärkande av tilltron för systemet genom demonstrations- och storskaleförsök.

Sättet att ta tillvara den utländska forskningen spänner över hela skalan från insamlande av rapporter och data till aktiv svensk medverkan i gemensamma projekt.

3.2 GEOVETENSKAP OCH PLATS- UNDERSÖKNINGAR

Kanada

Syftet med den geovetenskapliga forskningen, som utförs inom det kanadensiska avfallsprogrammet, är att lokalisera stora plutoner inom den kanadensiska skölden lämpade för ett slutlager. Borrning och ytkartering utförs inom granitområdena Chalk River och

Atikokan, Ontario samt Whiteshell, Manitoba. Vidare undersöks gabbroområdet East Bull Lake i Ontario. Inom området intill Atikokan studeras det regionala grundvattenflödet i ett projekt som sträcker sig över de kommande åtta åren. Området som undersöks är 20 x 20 km och innefattar granitplutonen Eye-Dashwa med omgivande bergområde, där detaljerad kartering har utförts både av berget och de ytliga jordlagren. Samspelet mellan ytliga grundvatten och grundvattenrörelser på djupet studeras.

Inom East Bull Lake-området har gabbroanortositplutonen detaljundersökts med geofysiska metoder. Resultaten visar att både flygburen geofysik och mätningar på markytan ger goda möjligheter att förutsäga gabbrokroppens uppbyggnad. Gravimetriska och flygmagnetiska data indikerade att mäktigheten hos gabbro i registret var 400-800 m. Borrningar visade att mäktigheten var omkring 770 m. Korrelationen mellan ytkarterade zoner och VLF-indikationer är också god.

Ett omfattande program för grundvattenprovtagning genomförs. Hittills framkomna resultat tyder på att saltvatten påträffats på större djup. Olika teorier för saltvattnets ursprung har framförts, såsom att det skulle vara fossilt havsvatten uppkommet genom bergvattenreaktioner eller orsakats av läckage från Paleozoiska ytlager.

Till Whiteshell-området har underjordslaboratoriet URL (Underground Research Laboratory) förlagts. Försöksanläggningen tas ut under grundvattenytan inom en ostörd del av batoliten. Undersökningar för att hitta en lämplig plats för laboratoriet påbörjades 1979 och 1980 valdes ett ca 4 km²-område beläget 15 km nordost om Whiteshell Nuclear Research Establishment.

Syftet med URL-projektet är att studera korrelationen mellan ytligt observerade och på djupet påträffade sprickor och sprickzoner, geohydrologiska och geokemiska förhållanden i granitiskt berg, störning av berget orsakat av bergguttaget, inverkan av förhöjd temperatur och samverkan återfyllning-buffertmaterial-berg.

Omfattande geologiska, geofysiska och geohydrologiska undersökningar utförs dels på ytan, dels i borrhål inom URL-området. Undersökningarna visar att området är genomsett av tre subhorisontella sprickzoner. Ett nät av instrumenterade borrhål har anlagts för att bestämma de geohydrologiska förhållandena före schaktsänkningen och hur de förändras på grund av bergguttaget. Oberoende grupper utför modellberäkningar för att förutsäga hur schaktsänkningen påverkar grundvattenförhållandena. De uppmätta förändringarna ger sedan möjlighet att validera de olika modellerna.

Schaktsänkningen slutfördes mars 1985 och försök kan påbörjas under 1986. Anläggningen omfattar ett

255 m djupt tillfartsschakt, ett mindre ventilationschakt och ett antal bergrum där experimenten kan genomföras.

Schweiz

Med syfte att undersöka de geologiska förutsättningarna för lokalisering av ett lager för högaktivt avfall har sex borrhål ned till mellan 1 300 och 2 500 m borrats i kantonerna Aargau och Zürich. De ingår i det forskningsprogram med vilket NAGRA vill belysa grundvattenströmning på stort djup och berggrundens stabilitet inom ett 1 200 kvadratkilometer stort område i norra Schweiz. Inom området har även seismiska undersökningar utförts längs profiler i ett rutnät med en total längd av 700 km.

De fortsatta undersökningarna innefattar ytterligare borrhål i kanton Schaffhausen och eventuellt Solothurn. En utvärdering av undersökningarna görs 1987-88 då potentiella platser för lagret bestäms. Inom dessa utförs geofysiska mätningar i ett förtätat nät och kompletterande borrhål och mätningar i dessa. Undersökningarna skall göra det möjligt att 1995 föreslå lagrets slutliga placering. På den valda platsen kommer ett schakt att sänkas och tunnlar att tas ut för att möjliggöra detaljerade undersökningar på djupet.

Man följer noga den utveckling som sker av undersöknings- och mätmetoder i Europa och USA och har etablerat samarbete med Sverige, Frankrike, Tyskland, USA och Euratom. Schweiz deltar vidare i Stripaprojektet. Utveckling av mätmetoder och studier av bergens egenskaper på djupet utförs förutom i Stripa även vid ett berglaboratorium i Grimsel.

I fältundersökningarna läggs stor vikt vid bestämningar av bergmassans och sprickzonernas konduktivitet samt grundvattnets kemi. Man har där kommit fram till att den metodik som tagits fram i Sverige för närvarande är överlägsen övrig tillgänglig teknik. Detta gäller även mätning med radar i enstaka hål och mellanhålmätningar, som vid tester visat sig kunna ge en relativt detaljerad bild av bergets uppsprickning på upp till ca 150 m från hålen.

Geovetenskapliga aktiviteter USA

US Department of Energy, som har huvudansvaret, har, vad det gäller geologiska platsundersökningar, delat det operativa ansvaret på ett flertal "managing organizations". Dessa organisationer är:

Battelle ONWI	– Saltprogrammet.
Rockwell	– Karakterisering av basalt inom Hanford reservation.
Lawrence Livermore Laboratories	– Karakterisering av tuff.
Battelle OCRD	– Rekognosering och karakterisering av granitiska plutoner.

En följd av det spridda ansvaret å ena sidan och de stora olikheter mellan medierna å andra sidan, gör att koordinationen av de olika undersökningarna och resultaten är i det närmaste obefintlig.

För det första förvaret som skall kunna ta emot använt bränsle 1998 undersöks 8 platser eller områden:

Hanford	– Basalt.
Davis Canyon	– Skiktade saltlager.
Lavender Cayon	– Skiktade saltlager.
Deaf Smith	– Saltdomer.
Gulf Coast	– Saltdomer.
Richton	– Saltdomer.
Vacherie	– Saltdomer.
Yucca Mountain	– Tuff.

En genomgång av resultaten av förundersökningarna pågår och inom kort beräknas tre av platserna väljas för fortsatta studier och schaktsänkning. Att göra denna rankning måste vara mycket svårt, dels då platsernas egenskaper är mycket olika, dels när tillgängligt undersökningsresultat varierar från ett enstaka borrhål i några av saltdomerna till flera tiotals hål i t ex Hanford. De undersökningar och resultat som är av störst intresse för svensk del är de i basalt och tuff. Dessa undersökningar bedrivs med liknande teknik som våra platsundersökningar, och modellering och säkerhetsanalyser följer ett likartat mönster. Dock kan sägas att med de stora belopp som spenderas är verkningssgraden tämligen låg. Undersökningarna inriktar sig väldigt mycket på små detaljer och en väldig datatäthet och omfattning. Avsaknad av slutsatser och samordnad utvärdering i de olika stegen gör att arbetena är svåra att överblicka för en utomstående.

För det andra förvaret, som skall kunna ta emot använt bränsle år 2006, har man valt en annan strategi. Anledningen är att man vill försöka förskjuta lokaliseringen till östsidan, där huvuddelen av kärnkraften finns. I den plan som getts ut av DOE skall fem platser nomineras för detaljerad karakterisering 1991. Minst tre av dessa skall vara i kristallint berg.

Dagsläget är att 12 st s k "areas" har definierats inom de tre regioner med kristallint berg som utvalts. Dessa tre "areas" har en yta på mellan 100 km² till 1 000 km² och skall fram till 1990 undersökas översiktligt.

Eftersom det planerade lagret skall kunna ta emot ca 70 000 ton använt bränsle krävs en 6 - 8 km² stor yta.

Eftersom Sverige har bedrivit motsvarande undersökningar i kristallint berg sedan 1976, och har utvecklade metoder och instrument för sådana undersökningar, har DOE och Battelle intensifierat sitt samarbete med SKB. Battelle har också lagt ut ett rent konsultuppdrag, där SKB och samarbetande grupper skall hjälpa till med att formulera ett undersökningsprogram.

Finska högaktiva platsundersökningar

Det finska kraftbolaget TVO (Teollisuuden Voima Oy) är det enda bolaget som bedriver studier av använt bränsle. Bolaget har fyra reaktorer i drift och räknar med ett slutförvar för ca 1 200 tU.

TVO har i stort följt internationell forskning fram till 1983 och deltagit också tillsammans med finska industridepartementet i Stripaprojektet.

År 1983 påbörjades en inventering av möjliga bergplintar för ett slutförvar. Ett par hundra möjliga platser definierades och under 1986 beräknas TVO rekommendera ett tiotal platser för fortsatta platsundersökningar till stadsrådet.

Typområdesundersökningar, enligt liknande uppläggning som i Sverige, planeras att genomföras fram till 1992.

Under perioden 1993-2000 beräknas 2-3 områden att detaljundersökas och därefter kommer en plats att väljas för lokalisering av slutförvar.

Från svensk sida är det intressant att följa finsk utveckling och framför allt att ta del av fältdata som kommer fram, då undersökningarna bedrivs i ur svensk synpunkt mycket likartad berggrund.

3.3 UNDERJORDISKA LABORATORIER

För att bedriva forskning och utveckling beträffande lagring i berggrunden av radioaktivt avfall från kärnkraftverk fordras tillgång till en realistisk forskningsmiljö. De mekaniska och kemiska sambanden mellan berg, sprickmaterial, grundvatten och eventuella buffertmaterial bildar ett komplext integrerat system som det är svårt att efterlikna i ett laboratorium. Därför byggs "underjordiska laboratorier" i skilda geologiska miljöer på olika håll i världen.

Förutom det internationella samarbetet i Stripa gruva i Bergslagen, bedrivs liknande forskning i kristallina bergarter framför allt i Kanada, Schweiz och USA. SKB följer via sina bilaterala samarbetsavtal forskningen i dessa länder och deltar dessutom aktivt i arbetena i Kanada. Forskningsstationer i andra geologiska miljöer såsom exempelvis sedimentära bergarter och saltformationer finns representerade i bl a Belgien, Japan, Tyskland och USA. Dessa är av mindre intresse för svenskt vidkommande och behandlas därför inte här.

Många av de undersökningar som i dag utföres i utländska underjordiska laboratorier runt om i världen är varianter av försök som tidigare utförts i Stripa. Syftet med dessa upprepade försök är att med väldokumenterad teknik bestämma bergets platsspecifika egenskaper och därigenom öka det nationella kunskapsnivån. Många av de undersökningar, som i dag utföres i dessa underjordiska laboratorier, kommer troligtvis också att utföras på den plats där det använda bränslet slutligen kommer att förvaras.

Kanada

Atomic Energy of Canada Limited (AECL) bedriver sedan 1980 omfattande förundersökningar, se avsnitt 3.2, för ett underjordiskt laboratorium i granit kallat "Underground Research Laboratory" (URL). Ursprungligen var forskningen planerad att utföras huvudsakligen på nivån 240 meter under markytan, men efter ett nyligen upprättat samarbetsavtal med US Department of Energy kommer ytterligare en nivå på ca 450 meter att upprättas. Syftet med det större djupgåendet är framför allt att uppnå bergmekaniska och hydrauliska förhållanden som är realistiska för en slutförvarsnivå.

Forskningen har just påbörjats på 240 m-nivån och ett stort antal olika projekt planeras att genomföras på de bägge nivåerna. Ett urval av de planerade experimenten presenteras nedan:

- Undersökning av sprickors mekaniska, geohydrologiska, termiska och kemiska egenskaper i ett s k "heated block test". Försöket kommer troligtvis att genomföras i ett block av storleksordningen några kubikmeter och en noggrann kartläggning av de enskilda sprickornas egenskaper är därför möjlig.
- Undersökning av sorptionsegenskaperna i en enskild spricka som skär två borrhål med ett avstånd av ca 10 meter. Ett lågradioaktivt spårämne planeras att användas och erhållna data kommer att predikteras.
- Undersökning av samverkan mellan buffertmaterial, berg och kapsel. Till skillnad från de tidigare försöken i Stripa kommer undersökningen att begränsas till studier av enbart blandningar av lera och sand.
- Undersökning av olika injekteringsmaterial och injekteringsmetoder för att öka kunskapen beträffande tätning av berg.
- Undersökning av förändringar av bergets mekaniska egenskaper i samband med schaktsänkning och ortbrytning.

Schweiz

Det underjordiska laboratoriet i Schweiz - Grimsel Test Site (GTS) - är beläget nära Grimselpasset i alperna. Bergarten är granit och forskningsstationen är belägen i anslutning till ett underjordiskt vattenkraftverk. Forskningen bedrivs ca 1 000 meter in i berget och bergtäckningen varierar mellan 400 - 500 meter. Arbetet i GTS drivs som ett samarbete mellan Nationale Genossenschaft für die Lagerung Radioaktiver Abfälle (NAGRA), Schweiz och Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) samt Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH (GSF), Tyskland.

Den pågående forskningen startade 1980 och är för närvarande planerad att pågå till 1988. För svenskt vidkommande förtjänar följande undersökningar att omnämnas:

- Jämförelse mellan mekaniska och hydrauliska förändringar i berget på grund av fullortsborrning respektive sprängning av orter.
- Undersökning av sprickors egenskaper i samband med uppvärmning av berget i s k värmeförsök där avfallskapslarna simuleras av elektriskt uppvärmda behållare.
- Bestämning av medelpermeabiliteten i en stor bergmassa genom ett s k ventilationsförsök.

USA

I USA bedrivs underjordisk forskning i kristallina bergarter av Department of Energy (DOE) i Edgar Mine i Colorado, i Climax Mine vid Nevada Test Site (NTS) samt vid Hanford Site i staten Washington.

Arbetet vid Colorado School of Mines (CSM)

forskningsstation i den nedlagda Edgar-gruvan bedrivs i en granit med ca 100 meters bergtäckning. Gruvan används som en forskningsstation för geomekanisk forskning i allmänhet, men följande projekt bör nämnas i detta sammanhang:

- Undersökning av de mekaniska och hudrauliska förändringarna i berget orsakat av sk försiktig ortsprängning. Undersökningarna har innefattat bergmekanisk parameterbestämning, ultrasoniska mellanålmätningar, bergspänningsmätningar samt hydraultester.
- Undersökning av enskilda sprickors mekaniska och geohydrologiska egenskaper i ett sk "heated block test".

Arbetet i Climax-gruvan i Nevadaöknen bedrivs på ca 400 meters djup i granit. Forskningen, som påbörjades 1978, har i huvudsak bedrivits av Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) och omfattar bl a följande projekt:

- Sk värmeförsök med simulerade avfallsbehållare för att bestämma granitens termomekaniska egenskaper.
- Fullskaleförsök med använt bränsle som innefattade handhavandet från markytan och ner i deponeringshålen. Projektet omfattar också en jämförelse av effekterna från använt bränsle.

Hanford, Washington, är en av de platser som nämns som lämpligt för ett slutförvar för det högaktiva avfallet i USA. I anslutning till det område som undersökts med ett stort antal borrhål ligger också den sk Near Surface Test Facility (NSTF), som är en underjordisk forskningsstation i basalt. De experiment som genomförts i NSTF kan i korthet sammanfattas i värmeförsök liknande de som genomförts i Stripa samt blocktester.

3.4 KEMI

3.4.1 Grundvattenkemi

Allmänt

Provtagning och analys av grundvatten från lämpliga geologiska förvarsmedia genomförs i de flesta kärnkraftsländerna. Vatten provtas inom platsundersökningsprogrammen, från in-situ-laboratorier, och redan befintliga gruvor, borrhål, källor etc. Ofta går man även igenom äldre dokumenterat material.

Målsättningen är först och främst att få fram den allmänna kemiska sammansättningen och möjliga variationer för att kunna bedöma den miljö som kapslar, avfallsformer, återfyllnadsmaterial och eventuellt frigjorda radionuklider möter. Exempel på viktiga grundvattenkomponenter är; karbonat, klorid, fluorid, sulfat, fosfat, natrium, kalium, kalcium, magnesium, kväveföreningar och organiskt kol. Till detta kan fogas pH och ledningsförmåga. Om inte kraven är högt ställda går det relativt enkelt att mäta ett någorlunda bra pH-värde. Ledningsförmågan ger en snabb och enkel test på totalhalten lösta salter.

Trots att det i alla länder finns en hel del grundvattenkemidata tillgängliga, så vill man som regel ha en speciell provtagning inom själva avfallsprogrammet. En anledning till detta är att det är ont om analyser från tillräckligt stora djup. Viktigast är emellertid att man vill försäkra sig om tillräckligt bra prover för att kunna bevisa att vattnet har vissa kvaliteter. Exempel på detta är redoxegenskaper, pH-förhållanden, halt av lösta gaser, kolloider och organiska komplexbildare. Detta kräver analyser av spårämnen och speciell provtagning med högt uppdrivna krav på noggrannhet och därmed sammanhängande behov av tekniska resurser.

Ett led i förståelsen av vattenkemin, och dess betydelse för förvarets säkerhet, är utvärderingen av geokemidata. Här används i stor utsträckning datoriserade beräkningsmodeller som beskriver berggrundvattensystemet. Utvecklingen på det teoretiska området domineras av USA men kunnande finns i flera andra länder t ex Frankrike och England.

Att så långt som möjligt kunna sammanfatta och beskriva vattnets utveckling med en kemisk modell är naturligtvis önskvärt och eftersträvas av alla.

Att ta bra vattenprover är ingen enkel uppgift och många analyser är så känsliga att de bör göras direkt - helst redan nere i borrhålet. Särskilt höga blir kraven om man vill söka bestämma vattnets ursprung och historia från den allmänna kemiska och isotopkemiska sammansättningen. Det är lätt att förstå att även obetydliga inblandningar av vatten från borrhållningen, eller från områden nära markytan, blir helt fatala för t ex analys av tritium eller kol-14. Artesiska förhållanden eller spolvattenfri borrhållning finns rapporterade som goda förutsättningar, men räcker inte ens det alltid.

Numera är en rad isotopkemiska analyser möjliga och området expanderar med utvecklingen av nya sofistikerade instrument, t ex tillkomsten av laser- och acceleratorteknik. Allt är emellertid långt ifrån meningsfullt att analysera. Grundforskningsinsatser av den typ som i internationellt samarbete pågår i Stripa har varit av värde i det sammanhanget. Resultaten där visar vad som är fruktbarande och man kan inrikta undersökningarna på detta. Man har t ex lyckats visa att klor-36, som av flera skäl vore en utmärkt isotop för grundvattendatering, bildas spontant i normalt uranhaltigt, granitiskt berg och alltså inte är särskilt användbar där.

Naturliga isotoper av intresse är inte nödvändigtvis radioaktiva. Så ger t ex syre-18 och deuterium i vattnet information om vattnets ursprung. Praktiskt taget alla grundvatten, som mäts runt om i världen, är meteoriska, dvs har ursprungligen tillförts marken i form av nederbörd. Ett undantag är de mycket salta vattnen som rapporterats från undersökningarna i Kanada.

USA

I USA har man lagt ner mycket möda på att analysera grundvatten från Hanford (basalt) och Nevada (tuff). Inom tuff-programmet prövade man tidigt att göra flera av analyserna i fält. Tuff-förvaret i Yucca Mountain är också ovanligt såtillvida att man inte kan påräkna reducerande förhållanden. Ett problem med

undersökningarna i USA är att man i allmänhet inte har haft någon bra koppling mellan borrhning och vattenprovtagning. Hålen borrar inte sällan så, att en relevant vattenprovtagning försvåras, för att inte säga omöjliggörs. I Nevada används t ex stora mängder ytaktiva ämnen som sedan blev kvar i det porösa berget. Man ligger dock långt framme beträffande analys-teknik och har gott om välrenommerade geokemister i landet.

Inom basaltprogrammet i Hanford har man sökt koppla geohydrologi och vattenkemi men med blandat resultat.

Kanada

Kanada har en liknande urbergssköld som vi och där planerar man också att ha sitt förvar. Grundvattnet är emellertid ovanligt genom att ofta vara starkt salthaltigt på relativt ringa djup - ibland bara några hundra meter ner. De salta vattnen domineras av natrium-, kalcium- och kloridjoner. Halten klorid, som är den dominerande anjonen, kan vara så hög som 100-200 g/l. Här är som ovan nämnts även själva vattnet ovanligt såtillvida att det inte är meteoriskt. Detta förhållande upptäcktes redan vid en inventering av vattenprover från gruvor och återfanns sedan i prover från undersökningsprogrammet, t ex borrhålen i granit-plutonen i Atikokan och in-situ-laboratoriet URL i Manitoba.

Redoxmätningar har för det kanadensiska programmet varit problematiska, liksom för så många andra. Försök att sänka ner Eh- och pH-sonder har gjorts men med blandat resultat.

Specifikt kanadensiskt är att man efter provtagning och undersökningar i borrhålen kring URL installerat permanenta vattenprovtagare. Systemet förefaller att fungera bra och är väl värt att studera närmare.

I samband med URL-undersökningarna har man gjort goda försök att koppla den regionala variationen i vattnets allmänna och isotopkemiska sammansättning till den geohydrologiska bilden av vattenförbindelser i området.

I Kanada har man även jämfört provtagning av vatten från kärnborrade hål (vattenspolning) med hammarborrade (tryckluft). Det senare gav som väntat bättre resultat för tritiumanalyser.

Man intresserar sig också för gasprovtagning i grundvatten och speciellt de salta vattnen. Dessa är ofta ovanligt rika på metan.

Schweiz

Provtagningsprogrammet på undersökningsplatserna i Schweiz har föregåtts av en mycket noggrann inventering av vatten från naturliga källor.

De mycket djupa borrhålen på undersökningsområdena går, genom tjocka lager av överliggande sedimentärt berg, ner i det kristallina urberget. Eftersom man borrar i områden omgivna av höga berg, kan man allmänt räkna med artesiska förhållanden, vilket naturligtvis är gynnsamt ur provtagningssynpunkt. Man har dessutom ett mycket avancerat system för märkning och kontroll av spolvattnet.

Vattnet i det överliggande sedimentära berget skiljer sig från vattnet i det djupare liggande kristallina berget. För t ex Böttstein är isotopsammansättningen sådan att vattnet inte kan ha trängt ned från det sedimentära berget.

De djupa grundvattnen kan vara salthaltiga. I Böttstein har man t ex uppmätt 6 g/l klorid.

Även inom det schweiziska programmet har man sökt mäta redoxförhållanden och bl a använt sig av Eh-elektroder för att mäta järnhalt och uranhalt. Halten löst uran är mycket känslig för redoxförhållanden och dessutom ett av de ämnen man är intresserad av ur säkerhetssynpunkt. Likheten med andra aktinider gör uran generellt användbar som indikator på hur dessa ämnen påverkas i berg-vattenmiljön på djupet.

En särskild utrustning har utvecklats för att provta lösta gaser nere i borrhålet. Man har haft vissa problem med att få utrustningen att fungera, men idén är utomordentligt bra.

Finland

I Finland har man gjort flera inventeringar av befintlig grundvattenkemisk information och därvid även inkluderat svenska undersökningar. Det är naturligtvis rimligt med tanke på att det är samma urbergssköld vi intresserar oss för. Liksom hos oss finner man en benägenhet för salta grundvatten i kustnära områden. Halterna kan variera upp till några gram klorid per liter. Enstaka extremt salta vatten med kloridhalter upp till 10-20 g/l har påträffats i djupa borrhål (ca 1 km) för malmprospektering. Här är även, liksom i Kanada, metanhalten hög.

Grundvattnet analyseras även från de undersökningshål som borrar för avfallsforskningsprogrammet. Man har också utvecklat ett mobilt vattenlaboratorium för direkt analys av det uppumpade vattnet.

Frankrike

Frankrike utvecklar utrustning för att analysera grundvatten och dessutom mäta redoxförhållanden och lösta gaser. Djupa grundvatten från granitiskt berg i Auriat i Massif Central har analyserats. Instrumentutvecklingen är delvis knuten till borrhålen där.

Man utvecklar också en utrustning som man ännu så länge går ensam om. Den består av en sond som skall utföra radionuklidkemiska experiment nere i borrhålet, t ex sorptionsförsök. Fördelen är att man får en naturlig miljö som annars kan vara svår att simulera i laboratorium med reducerande förhållanden, kolloider, organiska komplex etc.

England

Även i England undersöks grundvatten från kristallint berg. Vatten från borrhål av olika djup och naturliga källor i Altnabreac i norra Skottland har analyserats och utvärderats. Vattenprov har även tagits från hydrotermala förekomster i Cornwall. En del av dessa vatten har en relativt hög salthalt (klorid) och man har sökt tolka detta som en följd av mineralvattenreaktioner vid förhöjd temperatur.

Belgien

En relativt omfattande grundvattenprovtagning har genomförts i akvifererna kring lerbakomsten i Mol i Belgien. Analyserna omfattar även isotoper, t ex kol-14. Man söker hålla god kvalitet på de kemiska analyserna genom att snabbt transportera isolerade prov till närbelägna laboratorier.

Västtyskland

Vatten kring saltkuppen i Gorleben provtas.

Japan

Grundvattenprov tas från djupa gruvor för analys och geokemisk utvärdering.

Italien

Porvatten från lera analyseras. Liknande undersökningar görs även i Belgien.

Australien

Grundvatten analyseras ingående i samband med undersökningarna av naturliga analogier (uranmineraliseringar). Se mer om detta i avsnitt 3.4.5.

Brasilien

Även här tas grundvattenprov i samband med studier av naturliga analogier (toriumförekomsten Morro do Ferro), se vidare avsnitt 3.4.5.

Sammanfattning

Alla länder med ett program för förvaring av radioaktivt avfall i berg undersöker grundvattnets sammansättning. Ambitionsnivån kan variera från land till land och även inom ett land beroende på plats och ansvarig organisation. Man kan dela upp målsättningen i tre steg med successivt växande svårighetsgrad.

- 1) Allmän kemisk sammansättning av grundvatten från olika platser och olika djup; normalvärden och variationer.
- 2) Kemisk modell för systemet grundvatten-berg; utveckling och stabilitet av grundvattnets kemiska egenskaper.
- 3) Sambandet geohydrologi-grundvattenkemi; grundvattnets historia och sambandet mellan olika akviferer.

De olika stegen kräver gradvis bättre provtagning, mera sofistikerade analyser och en större insats på utvärdering.

Gemensamt för alla undersökningar är den allmänna kemiska karakteriseringen som är helt nödvändig för att kunna bedöma kapselkorrosion, buffertstabilitet, upplösning av avfallsformen och migration av frigjorda radionuklider.

De grundforskningsbetonade insatser som gjorts har lett till en ökad förståelse för utvecklingen och stabiliteten, dvs den kemiska modellen för vattenberg-systemet. De har också gett en mer realistisk syn på vattnets isotopkemi - inte bara vad som är möjligt att analysera, utan också vad som är rimligt att tolka.

De mest avancerade undersökningarna har utförts av USA, Schweiz, Kanada och Finland tätt följda av

Storbritannien, Frankrike och Belgien. Återigen avses här endast undersökningar inom avfallsforskningsprogrammen. Arbetet inom Stripa-projektet under OECD/NEA förtjänar att framhållas speciellt. Geohydrokemigruppen har där gjort goda framsteg genom att sammanföra specialister från olika länder och utföra undersökningar av grundforskningskaraktär på bl a isotopkemiområdet.

Mineral- och särskilt sprickmineralundersökningar hänger intimt samman med grundvattenkemin. Det är vanligt att man söker koppla förekomsten av vissa mineral till grundvattensammansättningen. Mineral i vattenförande sprickor speglar också vattensammansättning och geohydrologiska förhållanden, utan att dela grundvattnets extrema känslighet för provtagningsförhållanden. En allmän karakterisering av sprickmineral från en undersökningsplats ger nödvändig information för en eventuell radionulidmigration - inte enbart sorptionsförmågan utan också genomsläppligheten av radionuklider till underliggande berg och redoxpåverkan.

Mineral och sprickmineralkarakterisering i samband med grundvattenundersökningar är kända från USA och Schweiz men torde med tiden få märkbar omfattning i de flesta här behandlade länderna.

3.4.2 Radionuklidkemi

Termodynamisk databas

Grundläggande termodynamiska konstanter som styr löslighet och speciering av radionuklider i grundvattenmiljö, har i stor utsträckning tagits fram av andra skäl än avfallssäkerhet, t ex uppärbetning, uranutvinning eller ren grundforskning. En målmedveten förbättring och komplettering av denna databas för att fylla de behov, som finns inom avfallsprogrammen, pågår i flera länder. Ledande på det här området är f n USA, Kanada, Frankrike och Västtyskland.

Det finns ett starkt behov av internationellt samarbete på detta område. En verksamhet med inriktningen att samla in och bedöma en rimlig termodynamisk databas för radionuklider pågår inom UPAC, IAEA och OECD/NEA. Den sistnämnda organisationen gör en kraftfull insats för att inom överskådlig tid få fram en väldokumenterad och internationellt accepterad databas för de viktigaste radionukliderna. Arbetet ingår som en fristående del i upprättandet av sorptionsdatabasen ISIRS.

Sorption och retention

Sorption av radionuklider på mineralytor identifierades tidigt som en betydelsefull mekanism för retention av migrerande radionuklider. Ett omfattande experimentellt arbete är nedlagt på området och alla länder och internationella organ med ansvar för avfallsförvaring är allttjämt engagerade.

I sin enklaste form går dessa försök till så att bergbitar doppas ned i grundvatten med radionuklider. Efter någon tid mäts en fördelningskoefficient för radionuklider mellan mineral- och vattenfasen. En annan vanlig variant är att bestämma samma parameter

genom att följa retentionen av radionuklider i en kolumn med det krossade bergmaterialet. Experimenten utförs i laboratorium.

En avmattning i intresset för de traditionella sorptionsförsöken kan emellertid skönjas. Man börjar alltmer att söka efter de fysikaliska, kemiska mekanismer som styr förloppen. Målsättningen är då inte enbart att få en noggrannare behandling, utan också att undanröja oklarheter i vad som skulle kunna påverka retentionen på något avgörande sätt. För yt-sorption på rena mineralfaser, t ex oxider och hydroxider av aluminium, kisel och järn, finns redan teorier och modeller utvecklade. De här modellerna finns i många fall implementerade i geokemiska beräkningsprogram såsom EQ3/6, PHREEQE, MINEQL etc. Den teoretiska forskningen på det här området sker främst i USA och Schweiz följda av Frankrike och Kanada. Experiment med en systematisk inriktning för att avgöra mineralens roll i sorptionsprocessen pågår främst i USA och Kanada. Här ingår som en viktig del att bestämma mineralens roll i den naturliga reduktionen av redoxkänsliga nuklider som t ex teknetium, neptunium, plutonium och uran.

Inom OECD/NEA har man sedan relativt lång tid tillbaka samlat in och dokumenterat uppmätta fördelningskoefficienter för radionuklider mellan grundvatten och mineral av olika slag. Informationen samlas i databasen ISIRS. Nyttan av detta är emellertid begränsad. Fördelningskoefficienterna påverkas av en rad faktorer och om man inte har en bra modell är det nödvändigt att göra försöken vid förhållanden så likartade förvarssituationen som möjligt, dvs samma berg, grundvatten, temperatur, radionuklidkoncentration etc. Åtminstone måste man förvissa sig om att relevanta faktorer inte utelämnats. Det blir svårt att jämföra olika länder och olika tänkbara platser. Ett internationellt samarbete skulle bli verkligt fruktbart med en accepterad modell för yt-sorption och en inriktning på att bestämma de fundamentala konstanter som styr förloppen. Om något sådant är möjligt går inte att avgöra i dagsläget.

En växande insikt om betydelsen av den transportberoende delen av sorptionsprocessen, dvs diffusionen av radionuklider in i bergmatrisen, börjar göra sig gällande i många länder. Särskilt märks detta i USA, Kanada, England, Schweiz, Finland och nyligen även i Frankrike och Västtyskland. Det används för att tolka mera traditionella sorptionsförsök men framförallt som en mycket betydelsefull retentionsmekanism i migrationsmodeller. Målinriktade försök för att bestämma porositet, diffusivitet etc börjar också bli allt vanligare. Arbeten i Kanada, England och USA kan särskilt framhållas.

Kolloider, organiska komplex och mikrober

I grundvattnet finns kolloidala partiklar, organiska komplexbildare och mikrober. Dessa aggregat kan ta upp radionuklider och man kan åtminstone i princip, få både en högre löslighet och lägre sorption på mineralen än vad den rena oorganiska lösningskemin förutsäger.

En del radionuklider kan själva bilda kolloidala partiklar i en övermättad lösning. Försök som gjorts

tyder emellertid på att sådana kolloider inte är stabila i berg-grundvattenmiljön.

Betydelsen av kolloidburen radionuklidmigration är diskutabel och relativt lite studerad beroende på svårigheten att göra tolkningsbara försök. I USA, Kanada, Frankrike och Västtyskland görs kolloidarbeten ofta inriktade på upplösningen av avfallsformer eller mobiliteten av radionuklider i områden nära markytan. Betydelsefulla arbeten har gjorts av CEC laboratorier ISPRA i Italien.

Starka organiska komplexbildare i form av fulvosyror och humussyror finns i djupa grundvatten. Andelen fulvosyror dominerar och medelmolekylvikten är relativt låg. Med tanke på den potentiella betydelsen för radionuklidmigrationen är det ganska få undersökningar som görs inom ramen för avfallsprogram i olika länder, särskilt om man undantar biosfärsspridningsprogrammen. De mest betydande arbetena görs i USA, Frankrike och Belgien. De belgiska undersökningarna har speciellt identifierat betydelsen av humusämnen för radionuklidkemin i Boom-leror.

Mikrober kan överleva extrema förhållanden och deras förmåga att utnyttja potentiell kemisk energi är välkänd. Man kan inte utesluta deras närvaro men det är mycket svårt att ge rimliga uppskattningar av mikroorganismernas inflytande på upplösning och migration av radionuklider. Det är framförallt i samband med låg- och medelaktivt avfall som man har studerat effekten av mikrober. För högaktivt avfall är det egentligen endast en grupp i England som har varit påtagligt verksam.

Vid ett expertmöte, nyligen arrangerat av OECD/NEA, kom man till den slutsatsen att mikrober inte var av någon betydelse för migrationen av radionuklider från högaktivt avfall.

Sammanfattningsvis kan man grovt indela de här undersökningarna i tre grupper:

- Förekomsten av naturliga kolloider, humusämnen och mikrober i förvarsmiljö och omgivande berg.
- Styrkan i radionuklidernas bindning till dessa aggregat.
- Mobiliteten av radionuklider bärna av kolloider, naturliga organiska komplex och mikrober.

På området låg- och medelaktivt avfall tillkommer det faktum att avfallet självt innehåller en hel del olika organiska ämnen, som på olika sätt kan brytas ner och bilda t ex komplexbildare och gasformiga ämnen.

Radiolys

Produkter från radiolys av grundvatten kan ge gasutveckling och dessutom ändra den kemiska miljön i närområdet. Så är det t ex fullt möjligt att erhålla oxiderande förhållanden genom radiolys.

En del av gamma- och neutronstrålningen kan nå utanför kapseln och orsaka radiolys. Denna effekt är emellertid försumbar vid normala förvarsförhållanden. Svårare att bedöma är verkan av beta- och alfastrålning för det fall att det högaktiva avfallet kommer i direkt kontakt med grundvattnet. Omfattningen på radiolysen blir starkt avhängig av tillgänglig våt radioaktiv yta. Kinetiken för radiolysreaktioner vid en yta

är heller inte lika välkänd som för homogena system. Man har därför rört sig med ogynnsamma antaganden då effekten av alfa- och beta-radiolysen för vattenexponerat avfall bedömts.

Mer eller mindre avancerade radiolysberäkningar görs i USA, Kanada och Schweiz.

Frankrike, Västtyskland och England

Det är ganska ont om relevanta radiolysexperiment inriktade på det högaktiva avfallet. I Kanada, USA och England pågår dock en del försök. Gasutveckling på grund av radiolys i låg- och medelaktivt avfall har undersökts i bl a USA och Västtyskland.

3.4.3 Radionuklidtransport

Samtliga länder med ett program för geologisk deponering av radioaktivt avfall arbetar med modeller för uttransport av frigjorda radionuklider. Utgångspunkten är alltid geohydrologiska modeller för vattenflödet i förvarsområdet. Det är ju vattnet som är det rörliga mediet och hur vattnet rör sig i berget måste bli av primär betydelse.

Vatten i kristallint berg flödar genom sprickor. Sprickornas fördelning, och framförallt fördelningen av förbindelserna mellan sprickorna, förväntas medföra att en liten del av flödet går betydligt snabbare än huvuddelen.

Tills vidare måste man räkna med förekomsten av denna s k kanalbildning. Fastän endast en mycket liten del av aktiviteten kan transporteras snabbare den vägen, så blir betydelsen stor genom att radionukliderna i flera fall hinner nå fram innan de avklingat.

En annan betydelsefull geohydrologisk förutsättning är de anhopningar av sprickor i zoner, som uppkommit pga tektonisk påverkan eller i gränsen mellan olika bergarter. Huvuddelen av vattenflödet i berget förväntas gå via dessa s k sprickzoner.

Allt vatten i berget är inte rörligt. Vätskeinnslutningar i mineralkristaller är naturligtvis helt stationära men även vatten i sprickor kan vara praktiskt taget stagnant och opåverkat av flödet i det övriga vattenförande spricksystemet. Det gäller speciellt mikrosprickor där vattnet knappast kan strömma vid de låga tryckgradienter som är aktuella. Upplösta radionuklider kan emellertid nå dessa partier av berget genom diffusion. Man har visat att detta är en väsentlig mekanism för att fördröja uttransporten av radionuklider.

En modellbehandling av radionuklidmigrationen innebär alltid att man mer eller mindre förenklar förutsättningarna. Likväl vågar man nog ändå påstå att de modeller som till sist används, för att på allvar bedöma säkerheten för en föreslagen förvarsplats i kristallint berg, innehåller de ovan beskrivna elementen kanalbildning, indiffusion och transport i sprickzoner. Schweizisk modellbehandling är ett bra exempel där ovanstående påstående stämmer in och en liknande utveckling kan iakttagas i Kanada, USA och England.

Upplösta radionuklider sorberas av mineralytorna. Sorptionen beror på ytans och radionuklidens kemiska egenskaper. Variationerna i sorptionens styrka är stor, men rent generellt sorberas de allra flesta radionukliderna mycket kraftigt. Det ger en viktig retention av vattentransporterade radionuklider. Alla modeller för radionuklidmigration - även de allra enklaste - inkluderar ytsorption. Som regel sker det genom användningen av experimentellt bestämda fördelningskoefficienter sk K_d -värden. Återigen är det här generellt för alla länder som arbetar med slutförvaringsproblematiken.

Även diffusiviteten av radionuklider påverkas av ytsorptionen. Många ämnen som sorberas är t ex ändå överraskande rörliga i en lera eller bergets mikrosprickor. Genom diffusion in i bergets mikrospricksystem blir dessutom en mycket stor yta tillgänglig för ytsorption. Det finns således även en stark koppling mellan diffusionstransport och radionuklidsorption.

På senare tid har man emellertid också börjat koppla mera avancerade geokemiska modeller för retention till hydrologimodeller för att mera fundamentalt beskriva radionuklidmigrationen. Utvecklingen inom det gebitet leds av USA men pågår även i Frankrike.

Transport av en del icke radioaktiva ämnen spelar en avgörande roll för förvarets säkerhet. Det gäller t ex all intransport av ämnen som påverkar korrosion och upplösning i närområdet, men även all uttransport av ämnen som kan påverka närområdet kemiskt eller mekaniskt, t ex korrosionsprodukter, gas, redoxaktiva ämnen etc. Modellhanteringen på det här området har avancerat längst i USA, Kanada, Schweiz, England och Frankrike, men är på god väg i alla länder med vattenförande media som förvarskoncept (kristallint berg, lera etc.).

Sammanfattningsvis så behärskar alla här aktuella länder konsten att göra migrationsberäkningar genom att utgå från en väg för vattenflödet samt att anta poröst medium och retention av radionuklider genom sorption på mineralytorna. Utvecklingen går främst mot mera avancerade hydrologimodeller, men man inför även gradvis en mera avancerad behandling av retentionen, dvs indiffusion i bergmatrisen, och kemiska modeller för ytsorption. Kopplade geokemihydrologi-modeller börjar också att utvecklas.

3.4.4 In-situ-försök

Sorberande radionuklider

Migrationsförsök med radionuklider - verkliga eller simulerade - in-situ är svåra att genomföra och tolka. Dels beror det på svårigheterna att kontrollera försöksbetingelserna, dels är retentionen även för måttligt och svagt sorberande radionuklider i allmänhet så kraftig att antingen högt flöde, lång observationstid eller kort migrationssträcka krävs. Höga flöden gör försöket mindre representativt för förvarsförhållandena och lång observationstid är i bästa fall opraktiskt. Försök med korta migrationssträckor har genomförts i Stripa inom OECD/NEA-projektet där. Utvärderingen har till stor del baserats på friborrning av sprickorna och analys av sprickytorna, eftersom t o m strontium vandrat "långsamt".

Praktiska svårigheter och höga kostnader gör in-situ-försök med sorberande radionuklider eller radionuklidliknande ämnen ovanliga. Utom i Stripa har försök i Sverige med cesium och strontium genomförts mellan borrhål som borrats från markytan. Det är sällsynt med liknande undersökningar i andra länder. I Frankrike har försök gjorts med strontium mellan borrhål i Auriat i Massif Central. I sydvästra England, Cornwall, görs spår-försök i ett gammalt stembrott. Bergarten är granit. Här har utom jod även strontium och cesium använts i en spricka med ca 1 m mellan injektions- och provtagningsstället.

I Climax-gruvan i Nevada (granit) planerades försök liknande dem i Stripa men kom aldrig till utförande. I Japan finns planer på migrationsförsök i nedlagda gruvor.

USA men även England, Frankrike och Kanada har markdeponier av radioaktivt avfall som anlades redan på 40-talet. Flera undersökningar har gjorts av vilken omfattning och hur radionukliderna sprids med grundvattnet. Även om spridningen främst sker i jord och sand nära markytan, har man fått en god inblick i den kemiska specieringens betydelse. Snabbaste transporten får man inte oväntat där syntetisk chelatkomplexbildare som t ex EDTA ingår i avfallet. Men även naturliga organiska eller oorganiska neutrala eller anjoniska komplex har en betydande inverkan på transportförloppet. Som regel stämmer de förutsägelser som gjorts på basis av sorptionsförsök i laboratorium rätt väl, men betydelsefulla avvikelser har i en del fall konstaterats.

Atombombsprov under jord i USA har också varit föremål för undersökningar av radionuklidspridning med grundvatten. Spridningen har här varit obetydlig.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att för migrationsförsök med sorberande radionuklider eller radionuklidliknande ämnen är man alltså i stor utsträckning hänvisad till laboratoriet. En form av laborieförsök, som i hög grad efterliknar in-situ-förhållanden är att använda borrhål eller hela bergblock med naturliga sprickor. Det medger att man kan ha kontrollerade försöksbetingelser och korta migrationssträckor men i övrigt så naturliga förhållanden som det går att få. Utom i Sverige görs sådana försök framförallt i Kanada.

Icke sorberande spårämnen

Transportförsök in-situ med icke sorberande spårämnen är däremot tämligen vanliga. Dessa spårämnen behöver inte ha något direkt gemensamt med radionuklider utan skall följa vattnet så troget som möjligt och helst vara kvantitativt analyserbara redan vid mycket låga halter. Här är målsättningen först och främst att utreda geohydrologiska förhållanden.

Injektion av icke sorberande spårämnen har använts i Stripa för att undersöka bergets åtkomliga mikroporositet under ostörda förhållanden.

Övrigt

En typ av in-situ-försök, som diskuterats här och av grupper i USA, är att undersöka bergets och grundvattnets redoxkemi genom att injicera oxiderande vatten och sedan studera reaktionen.

3.4.5 Naturliga analogier

Med naturliga analogier till slutförvaring av radioaktivt avfall hoppas man kunna pröva modeller för frigörelse, migration etc i en mera realistisk tidsskala, där det helt naturligt inte går att göra försök. Nu finns det inte något naturligt system som i alla avseenden efterliknar förhållandena i ett projekterat slutförvar, men ofta är det möjligt att skilja ut enskilda naturliga processer som är gemensamma, t ex frigörelsen och mobiliteten av nukleära reaktionsprodukter ur den naturliga reaktorn i Oklo i Gabon, diffusionen av radionuklider i lersidementen i Loch Lomond i Skottland och transporten av torium med partiklar och organiskt material i Morro do Ferro i Brasilien.

Ett ökat samarbete mellan å ena sidan de som utför undersökningarna; geologer, kemister etc, och å andra sidan migrationsmodellörer och säkerhetsanalytiker, har efterlysts. Det gäller såväl planering som utvärdering av redan genomförda försök. En tidig fokusering på relevanta frågeställningar framstår som helt nödvändig.

USA

I USA har man varit engagerad i olika internationella projekt: Oklo, Morro do Ferro och Aligator Rivers (Australien). Dessutom pågår undersökningar av analogier inom landet, t ex i och omkring urangruvan i Marysvale, Utah. Inriktningen är framförallt att få en inblick i betydelsen av hydrotermala processer. Marysvale-undersökningarna är ett exempel på detta. En typ av högtemperaturanalogier, som man studerat ingående, är kontaktzonerna mellan gamla magmaintrusioner och olika äldre bergarter; tuff i Platoro (Colorado), gnejs i Eldora (Colorado) och basalt i Hood River (Oregon). Man har undersökt hur fördelningen av t ex uran, torium, cesium, strontium och sällsynta jordartsmetaller har påverkats i kontaktzonerna.

Analogier som visar betydelsen av förhöjda temperaturer i förvaret är av speciellt intresse i USA. Här räknar man med betydligt högre värme än t ex de svenska KBS-förslagen.

Även i Frankrike undersöks hydrotermala analogier. Man inriktar sig mot rörlighet av radionuklidliknande ämnen t ex i La Telhai i Bretagne och i Langenberg i Vosges och vittring till följd av förhöjd temperatur.

Franska vetenskapsmän har även spelat en framträdande roll i undersökningarna av Oklo-reaktorerna som utfördes mot slutet av 70-talet.

Kanada

I Kanada undersöks rörligheten av naturliga radionuklider och radionuklidliknande ämnen i granitiskt berg i Atikokan och kring uranmineraliseringar i norra Saskatchewan. En av dessa, Cigar Lake, har upptäckts relativt nyligen. Uranförekomsterna innehåller lera och ibland även grafit, vilket i båda fallen är aktuella återfyllnadsmaterial i de slutförvarslösningar som diskuteras i Kanada.

England

En engelsk undersökning av radionuklidmigration i lersedimenten i Loch Lomond har nyligen genomförts. Resultaten är av betydelse för det fall att lera väljs som återfyllnadsmaterial, eller om en lerformation väljs som förvarsmedium.

Italien

Av liknande skäl som i England görs i Italien undersökningar i naturliga lerformationer i Onite. Här ser man speciellt även på utvecklingen av en redoxfront i leran. Engelsk expertis medverkar.

Schweiz

Schweiz deltar i undersökningarna i Morro do Ferro i Brasilien. Man studerar även naturlig migration i granitiska bergprover nära vattenförande sprickor. Undersökningarna tillgår så att man utväljer lämpliga borrhävar, som skär vattenförande sprickor, och analyserar naturliga radionuklider och järnmineral etc ut från sprickan. Detta görs i samarbete med SKB och borrhävar från såväl Schweiz som Sverige ingår i studien.

Brasilien

Brasilien är naturligtvis engagerat i undersökningarna av torium-mineraliseringen i Morro do Ferro. Sammanfattningsvis deltar dessutom USA, Schweiz och vi själva. På senare tid har också CEC och England visat intresse. Tyngdpunkten i hittills utförda undersökningar har legat på biosfärsspridningsdelen. Den lättroderade formationen, med sin osedvanligt höga halt av torium och radium, ligger intill en liten bondgård. Detta har studerats grundligt och några hälsovådliga upptag av radionuklider hos gårdens folk har inte konstaterats.

Uran bör ha funnits i betydligt högre halter men troligen lakats ut. Morro do Ferro är däremot exceptionellt rik på sällsynta jordartsmetaller. Troligen spelar organiska ämnen en stor roll för migrationen nere i formationen - speciellt för torium.

I Poços de Caldas-området, där Morro do Ferro ligger, finns också en mycket rik urangruva. Här är redoxövergångarna och deras betydelse för uranmineraliseringen ovanligt tydliga och lätta att studera. Planer finns att närmare undersöka detta.

Australien

Australien har själv inga kraftproducerande reaktorer, men man är en stor exportör av uran och anser sig därför förpliktad att delta i forskningen kring omhändertagandet av det högaktiva avfallet. Därutöver har man naturligtvis ett mycket närliggande intresse av att lågaktivt avfall från uranutvinning, och annan verksamhet, omhändertas på ett säkert sätt.

I samarbete med USA har man under några år undersökt migration av naturligt förekommande radionuklider i och omkring uranmineraliseringarna i Aligator Rivers-området. Utmärkande för dessa studier har varit goda analyser och allvarliga försök till applicering av transportmodeller på mätresultaten.

Australien söker för närvarande ett utökat internationellt stöd och samarbete för utvärdering av Aligator Rivers-analogerna.

IAEA

De naturliga reaktorerna i Oklo i Gabon undersöktes och resultaten utvärderades i IAEAs regi i slutet av 70-talet. Oklo-reaktorerna var aktiva under några hundratusen år för ca två miljarder år sedan. Omkring 10 ton uran kärnklövs och utöver klyvningsprodukterna bildades bl a ca fyra ton plutonium. Man vet att vatten fanns med, annars hade kriticitet varit omöjlig. Såväl radiolys som utlakning och migration av radionuklider måste då också ha förekommit. En del element har också uppenbarligen varit rörliga i större eller mindre grad men det är helt klart att "härden", och det mesta av dess innehåll av t ex aktinider, inte har påverkats nämnvärt. Uranmineralkristallerna är anmärkningsvärt oförändrade.

Oklo-fenomenet är helt unikt och kanske det bästa naturligt förekommande exemplet vi har på upplösning av utbränt bränsle, radiolys och transport av redoxkänsliga element såsom teknetium, neptunium och uran i närområdet. Särskilt teknetiumfrigörelsen är väl undersökt.

CEC

Undersökningarna i Loch Lomond i England, Onite i Italien samt Langenberg och La Telhai i Frankrike, som här behandlats under respektive land, har utförts inom ramen för CEC-samarbetet. Det är också värt att notera att CEC på senaste tiden klart deklarerat sitt intresse för just naturliga analogier. En grupp har etablerats för internationella diskussioner där även SKB deltar.

3.4.6 Betong

Undersökningar av radionuklidernas kemi i betong ingår naturligt i praktiskt taget alla kärnkraftländers forskningsprogram (och för övrigt inte bara i kärnkraftländer). Det är mycket vanligt att stabilisera och förpacka låg- och medelaktivt avfall i betong. Att fastställa processerna för löslighet, sorption och diffusion av radionuklider ur betong borde vara målet, men vanligen görs enkla lakförsök där det kan vara svårt, för att inte säga omöjligt, att urskilja de olika processerna. Relativt bra arbeten görs i USA, Kanada, Frankrike, Västtyskland, England, Finland och Schweiz.

Genom att avfallet i betong som regel intimt blandas med vatten kan radiolys inte uteslutas och sådana undersökningar görs bl a i USA, Frankrike och Tyskland.

England intar en särställning, eftersom man numera inriktar sig på användningen av betong som återfyllnadsmaterial vid deponering av högaktivt avfall. Man anser att betongen skapar en miljö i närområdet som hämmar korrosionen (järnkapslar) och även radionuklidfrigörelsen. De kemiska förändringarna i närområdet spelar med tiden en viktig roll för detta koncept. Det gäller framförallt pH-förändringar. Studierna är intressanta och förtjänar att bevakas.

Påverkan på betongen från närområdesmiljön, t ex från grundvattnet, undersöks inte i så stor utsträckning som man kunde vänta sig. Länder med salt som förvarsmedium, framförallt USA och Tyskland, gör emellertid en hel del försök med betong och saltlösningar ihop. Här övervägs också användningen av betong som tätningsmaterial för borrhål i saltkroppen.

Sammanfattningsvis kan man säga att betong är ett mycket användbart och också mycket använt material inom avfallshanteringen. Det är också ett mycket komplicerat material, som kan variera betydligt i sammansättning och egenskaper beroende på cementsort och ballastmaterial. Dessa förhållanden gör naturligtvis FoU angelägen.

3.4.7 Övrigt

Internationella organisationer spelar en stor roll genom att samla olika länder, eller åtminstone expertis från olika länder, kring gemensamma utvärderingar och projekt. Man bidrar också med verksamheten till att sprida kunskaper och teknik till olika länder. Exempel på sådana organisationer är IAEA, OECD/NEA och CEC, som har behandlats i texten ovan.

Vad som däremot inte speciellt har framhållits är att flera av de undersökningar som här beskrivits för respektive europeiskt land görs inom ramen för CEC. CEC fördelar härigenom betydande belopp och samordnar stora resurser på avfallsforskningsområdet.

Den del av verksamheten som berör migration av radionuklider, dvs radionuklidkemi, geohydrologi, transportmodeller, in-situ-försök och naturliga analogier hålls av CEC samman inom projektet MIRAGE, Migration of RADionuclides in the GEosphere. Projektet startade 1982 och under 1985 gjordes en större avrapportering. En ny fas planeras nu med inriktning bl a på in-situ-försök och naturliga analogier.

3.5 AVFALLSFORMER

Utbränt bränsle är, förutom i Sverige, en av de alternativa avfallsformerna eller det enda alternativet i USA, Kanada och Finland. Dessutom studeras utbränt bränsle av andra skäl i Frankrike och Västtyskland. Av dessa länder har Kanada och USA de klart största programmen.

Direkta experimentella undersökningar av utbränt bränsle som högaktivt avfall bedrivs på relativt få laboratorier. För att få ett effektivt informationsutbyte mellan forskare, som aktivt arbetar inom detta område, organiseras sedan 1981 årliga informella "workshops". Inom ramen för dessa ges möjligheter för utbyte av opublicerad information som är av stor betydelse för utvärderingen av pågående insatser och planeringen av kommande forskningsbehov.

USA

I USA är utbränt bränsle huvudalternativet för kommersiellt avfall. Efter 1982 bedrivs undersökningarna av utbränt bränsle inom ramarna för de olika förvarsprojekten och är platsspecifika, dvs undersökningarna görs med grundvattnet som referens och tillsam-

mans med andra komponenter som är specifika för varje förvarsplats. Sedan 1984 har dessutom dessa studier fått ökade anslag. Verksamheten bedrivs nu, delvis parallellt, inom Tuffprogrammet (NNWSI), basaltprogrammet (BWIP) och saltprogrammet (SRP). Allt laboratoriearbete utförs dock, om än med olika kontraktörer, i Hanford (Richland), WA. Utöver dessa studier bedrivs också viss verksamhet av Materials Characterization Centre (MCC), som ansvarar för karakterisering och distribution av det material (inklusive använt bränsle) som sedan används för de olika programmens undersökningar. Samtliga USA-program använder nu H. B. Robinson II-bränsle som MCC-godkänt testmaterial. (PWR-bränsle uttaget ur reaktorn 1974 med en utbränning på 31 MWd/kgU samt en gasfrigörelse på 0,2%).

Tuffprojektet (NNWSI)

Tuffförvaret är tänkt att ligga över grundvattennivån, dvs i princip ett åtminstone tidvis torrt förvar. Undersökningarna utförs i Lawrence Livermore Laboratoriets regi av Hanford Engineering Development Laboratory (HEDL). Utöver det ovan nämnda H. B. Robinson-bränslet används också PWR-bränsle från Turkey Point-reaktorn (uttaget ur reaktorn 1975, 27 MWd/kgU, 0,3% gasfrigörelse). Detta senare material är karakteriserat av HEDL. Eftersom förvaret ligger över grundvattennivån, utförs vid sidan av rena lakstudier undersökningar av lågtemperaturoxidation av bränsle /3.5.1/. Efter kapselgenombrott kan luft få tillträde till bränslet och genom oxidation omvandla materialet innan egentlig lakning startar.

I NNWSI-projektet har man tagit med Zircaloy-höljet på bränslet med avsikten att försöka tillgodoräkna sig höljet som barriär i förvaret och därigenom få en fördröjning i utsläppet av radionuklider från avfallet. Undersökningarna utförs i referensgrundvattnet med fyra olika provtyper /3.5.2/:

- Utbränt bränsle i segment med vattentäta ändar och intakt hölje.
- Segment med vattentäta ändar och laserborrade hål i höljet.
- Segment med vattentäta ändar och sågad spalt i höljet.
- "Naket" bränsle från öppnat bränslesegment plus det tomma höljet.

De mest aktuella resultaten från dessa tester finns rapporterade. /3.5.2/ och /3.5.3/.

Av speciellt intresse från svensk utgångspunkt är att grundvattnet i tuff är mycket likt granitiskt grundvattnet och resultaten från NNWSI kan direkt jämföras med svenska resultat från undersökningar vid oxiderande förhållanden. En väsentlig skillnad är givetvis att för NNWSI är oxiderande förhållanden normalfallet, medan man i svensk djup berggrund förväntar sig reducerande förhållanden i grundvattnet. Trots detta ger Tuff-programmet värdefull kompletterande information till det svenska programmet, även om inriktningen är sådan att den inte direkt ersätter svenska undersökningar. Ett undantag är studierna avseende luftoxiderat bränsle, som även kan ge väsentlig information för tolkning av de svenska laboratorieresultaten.

Basaltprojektet (BWIP)

Basaltprogrammet är i huvudsak inriktat på hydrotermala tester av barriärmaterial (inklusive utbränt bränsle). Syftet är att bestämma tidsberoende koncentrationer av radionuklider (dvs löslighetsgränser), som kan kopplas till transportfenomen för att ge försvarbara data för långtidsutsläpp från förvaret.

Fram till nu har resultat av två månaders exponering vid 200°C i basaltiskt grundvatten m m rapporterats /3.5.4/. Dessa resultat visar dock att längre exponeringstider behövs för att stationära förhållanden skall uppstå.

Basaltprojektet ger inte på samma sätt som Tuffprojektet data som har direkt tillämpning på svenska förhållanden. Detta beror på att de betydligt högre temperaturerna i de amerikanska testerna och på att det basaltiska referensgrundvattnet avviker relativt mycket från det svenska referensvattnet. Studierna bidrar givetvis till en ökad förståelse för systemet utbränt bränsle/grundvatten och ger därigenom information, som är av betydelse för det svenska programmet.

Saltprojektet (SRP)

Experiment för att utvärdera utsläpp från utbränt bränsle i ett saltförvar har utförts av Battelle PNL i saltlösningar som antingen beretts av upplösta borkärnor eller simulerade koncentrerade saltlösningar. Även lösningar som simulerar vätskeinklusioner i salt har använts. Experimenten utförs med bränslefragment utan kapsling vid 25°C och 75°C och de senaste resultaten finns rapporterade /3.5.5/.

Resultaten från Saltprojektet saknar givetvis direkt tillämpning i det svenska programmet, men kan ge viss information om experimentella tekniker m m.

Kanada

I Kanada är utbränt bränsle huvudalternativet för högaktivt avfall. Undersökningar av beständigheten av utbränt CANDU reaktorbränsle har pågått vid Whiteshell Nuclear Research Establishment sedan 1977 /3.5.6-3.5.9/. Det kanadensiska CANDU UO_2 -bränslet är tillverkat av oanrikad uran för användning i tungvattenreaktorer. Utbränningsgraden är lägre än för lättvattenreaktorer. Det bränsle som använts i de kanadensiska undersökningarna har haft en utbränning på 6-8 MWd/kgU, som är typiskt för CANDU reaktorer. Lakstudierna är utförda vid två olika temperaturer, 25°C och oxiderande förhållanden, och 150°C vid såväl oxiderande som reducerande förhållanden.

Inom det kanadensiska programmet har utöver de ovan nämnda studierna också gjorts undersökningar av mer grundforskningskaraktär av UO_2 oxidation samt inverkan av α -radiolys på oxidation och upplösning av UO_2 , se t ex /3.5.10/.

Det kanadensiska programmet är av speciellt intresse för Sverige. Trots skillnader i bränsletyp, och i viss mån även grundvattenkemi, är de geologiska förhållandena för de planerade förvaren i Sverige och Kanada likartade. Det kanadensiska programmet för studier av använt bränsle är dessutom det mest omfattande i världen. För de närmaste åren fortsätter lakexpe-

rimenten. Syftet är att bestämma hur bränslets lakegenskaper beror av temperatur, pH, Eh och vattenkemi. Dessa undersökningar kommer också att vara starkt knutna till grundläggande studier av mekanismerna för oxidativ upplösning av UO_2 , speciellt med tonvikt på α -radiolysens inverkan. Till detta kommer relevanta termodynamiska data att insamlas eller bestämmas.

Utöver de ovan nämnda lakexperimenten har man för de närmaste åren program för karakterisering av utbränt bränsle. I en första etapp kommer tillgängliga data, relevanta för bränslets lakbeständighet, att insamlas. Dessa data är bland annat uppgifter om förändringar i bränslets struktur under bestrålning, fissionsprodukternas kemiska tillstånd i bränslet och segregationer av diskreta fissionsprodukthaltiga faser.

1984-85 startades försök med "multikomponent"-system, där växelverkan mellan avfallet och andra komponenter (buffertmaterial, granit osv) i närområdet skall studeras /3.5.11/. I den första fasen var avfallsformen förglasat avfall, men i en andra fas (start 1985-86) kommer dessa försök att utföras med bränsle som avfallsform.

Utöver att utbyte av resultat och erfarenheter från det kanadensiska programmet generellt sett är värdefulla för det svenska programmet, har de kanadensiska studierna av inverkan av α -radiolys i många avseenden direkt tillämpning på svenska förhållanden. Givetvis måste kompletterande svenska undersökningar av α -radiolys utföras, dels på grund av skillnaderna mellan svenskt lättvattenbränsle och CANDU-bränsle och på grund av skillnaderna i förväntad grundvattenkemi, dels för att på kritiska punkter bekräfta resultat.

Försök med "multikomponent"-system är även planerade i det svenska programmet och erfarenheterna från Kanada kommer att vara av stort värde vid detaljutformningen av försöksuppställningar och provtagningsutrustningar.

Västtyskland

Inom ramen för Projekt Andere Entsorgungstechniken (PAE) (slutrapport 1985) utfördes vid KWU undersökningar av lakbeständigheten hos PWR-bränsle i slutförvar i saltformationer /3.5.12/. Försöken genomfördes vid 100°C och 200°C i mättade saltlösningar på bränsle med en utbränning av 33 MWd/kgU.

På grund av de stora skillnaderna i grundvattenkemi har de tyska undersökningarna inga direkta tillämpningar på det svenska programmet, även om resultaten givetvis ger indirekt information, som kan vara av betydelse för tolkning och förståelse av de svenska resultaten.

Frankrike

Under 1986 kommer CEA att starta undersökningar av lakbeständigheten av Fénix bränsle. Även om FBR-bränsle avviker betydligt från LWR-bränsle, kan dessa undersökningar potentiellt ge information om i synnerhet plutoniumlakningen och eventuella löslighetsbestämmande fasta plutoniumfaser.

Finland

Inom det finska programmet görs för närvarande endast undersökningar av obestrålat bränsle.

3.6 KAPSEL - MATERIAL OCH UTFORMNING

Samtliga länder, som bedriver forsknings- och utvecklingsarbete riktat mot slutförvaring av högaktivt avfall från kärnreaktorer, förutsätter att avfallet skall kapslas in i en tät behållare före slutdeponering. Den tidsperiod, under vilken kapseln skall bibehålla sin integritet, varierar, men i stort kan man urskilja två huvudlinjer. I de flesta länder är målet för absolut inneslutning i kapsel 300-1000 år, medan Sverige, och även några andra länder, för närvarande har långtidsinneslutning (ca 100 000 år) som huvudalternativ.

Kraven på material och metoder för utvärdering av korrosionsbeständighet kan givetvis vara helt skilda, beroende på vilken funktion kapseln avses ha. Dessutom är förvarsmediet olika i de olika ländernas program. I den följande redogörelsen beskrivs endast materialval och korrosionsutvärderingar för förvar, som geologiskt och geokemiskt är relativt lika det svenska. I huvudsak innebär detta att korrosionsstudier avseende salt inte behandlas.

De materialtyper, som aktualiserats för kapslar, kan grovt indelas i fyra kategorier:

- 1) Termodynamiskt (partiellt) stabila material, t ex koppar.
- 2) Korrosionsbeständiga material, t ex titan, hastelloy och rostfritt stål.
- 3) Korroderande material, t ex kolstål.
- 4) Korrosionsbeständiga, icke-metalliska material, t ex keramer och cement.

Valet av material dikteras i första hand av önskad livslängd på kapseln och de kemiska förhållandena i kapselns närområde efter deponering, men ekonomiska överväganden har också betydelse.

De länder, som har mer omfattande forsknings- och utvecklingsprogram och dessutom avser förhållanden, som är relevanta för Sverige är: Belgien, Frankrike, Italien, Kanada, Schweiz, Storbritannien och USA. Av dessa har EG-länderna utöver sina nationella program också forskningsprogram inom ramen för EG-samarbetet.

Belgien

Det belgiska programmet har som huvudalternativ slutförvaring i lera. Sedan flera år tillbaka pågår studier av korrosion kapsel och konstruktionsmaterial i lermiljö och i fuktig leratmosfär. De material som studeras är dels EGs referensmaterial: kolstål, 0,2% Pd och hastelloy C-4, plus en del andra material, som tekniskt ren titan, inconel och andra stålsorter. Laboratorieresultaten finns bland annat redovisade i referenserna /3.6.1/ och /3.6.2/. Även om Boom-leran kemiskt i många avseenden avviker betydligt från bentonit är de belgiska undersökningarna av intresse, trots att resultaten inte direkt kan tillämpas på svenska förhållanden.

Utöver laboratorieförsöken kommer in-situ-försök att utföras i underjordslaboratorium. Dessa experiment omfattar både studier av korrosion i leratmosfär och i direkt kontakt med leran. I det senare fallet

används för ändamålet konstruerade "korrosions-slingor", med hjälp av vilka proverna placeras 5 m in i orörd lera. Undersökningarna kommer att utföras vid ca 15°C, 90°C och 150°C /3.6.3/.

Frankrike

De franska undersökningarna genomförs delvis inom ramen för EG-samarbetet, men kompletteras också med ett rent nationellt program. Förvarsmedia är granit, lera och salt. Några mer förvarsområdesspecifika undersökningar pågår ännu inte, i alla fall inte i någon större omfattning, utan undersökningarna är av mer generisk art. Inom EG-samarbetet ligger tyngdpunkten på granitiskt förvar och CEA-FAR har koncentrerat arbetet på korrosionsbeständiga material /3.6.2/. I undersökningarna ingår dels EGs referensmaterial Hastelloy C4 och Ti med 0,2% Pd, men även andra material, som t ex Inconel 625 och Hastelloy C276 ingår. Bakgrunden till intresset för korrosionsbeständiga material är möjligheten att gjuta avfallsglas direkt i en behållare som kan slutdeponeras utan ytterligare inkapsling. Dessutom utförs undersökningar av låglegerat stål /3.6.4/. För korrosionsbeständiga material har studier av spaltkorrosion och gropfrätning i granitiska vatten gjorts. Dessutom har man genomfört vissa undersökningar av ståls allmänkorrosion. Utöver CEA, genomför CNRS/Vitry undersökningar av stabiliteten hos passivfilmen på nickelbaslegeringar och på titan /3.6.2, 3.6.5/.

Från svensk utgångspunkt är det viktigt att följa utvecklingen av det franska programmets studier av nickelbas-legeringar i granitiskt vatten eftersom inga sådana undersökningar planeras från svensk sida. Också undersökningarna av stålkorrosion bör ge värdefull information, som kan komplettera planerade svenska insatser på detta område.

Italien

Relativt litet information finns tillgänglig om relevanta korrosionsstudier i Italien. Tester har genomförts på låglegerat stål i Boom-lera och i havssediment. Speciellt har inverkan av karbonathalten i sedimenten studerats.

Kanada

Inom det kanadensiska programmet pågår studier av titan (och Ti-legeringar) /3.6.6/, koppar /3.6.7/, nickelbaslegeringar /3.6.8/ och keramiska material /3.6.9/. Programmet följer två huvudlinjer, dels material för inneslutning 500-1000 år (Ti, Ni-bas och Cu), dels material för "avancerad" inneslutning 20 000-50 000 år (keramer). Undersökningarna är baserade på förutsättningarna att förvaret skall ligga i granitiskt berg och att grundvattnet kan vara betydligt saltare än vad man funnit i Sverige (35 000 ppm Cl jämfört med ca 100 ppm). Maximala temperaturen i förvaret skall vara ca 150°C.

Huvudalternativet till kapselmaterial i det kanadensiska programmet är titan och två titanmaterial studeras: dels Ti-2 (kommersiellt ren titan), dels Ti-12 (legering med 0,3% Mo och 0,8% Ni). Titan har en mycket god korrosionsbeständighet i aggressiva miljöer. Man har därför bedömt det som osannolikt att

allmänkorrosion av titan skulle komma att begränsa livslängden på kapseln i förvarsmiljön. Undersökningarna har därför koncentrerats på de olika tänkbara lokala korrosionsfenomen som kan uppträda. Forskningsprogrammet på titan består av tre huvudområden: spaltkorrosion, väteförsprödning och titans långtidsbeteende under simulerade förvarförhållanden.

Vad avser spaltkorrosion undersöker man inverkan av tre parametrar: inverkan av radioaktiv strålning, inverkan av legeringselement och inverkan av vattenkemin. Man ligger långt framme med dessa studier och resultaten är i mycket kort sammanfattning att spaltkorrosion kan initieras vid så låg temperatur som 90°C och att Ti-12 är mer motståndskraftig än ren titan. För väteförsprödning tycks det omvända förhållandet gälla, dvs Ti-12 hydreras lättare än Ti-2.

Långtidsexperiment pågår för närvarande. Korrosionsprover har placerats i strålningsfält i kontakt med salt grundvatten både i närvaro och frånvaro av bentonit.

Titan är även för Sverige ett intressant alternativt kapselmateriäl. Genom att de omfattande kanadensiska undersökningarna avser en förvarsmiljö som är relativt lik den svenska, men med ett aggressivare grundvatten, är det sannolikt att framförallt resultaten från spaltkorrosionsstudierna är direkt tillämpbara på svenska förhållanden. Som remissbehandlingen av KBS-1 visade är kanske det största problemet med titan som kapselmateriäl dess eventuella känslighet för väteförsprödning. Även på detta område är det kanadensiska programmet värdefullt för Sverige.

Eftersom man i det kanadensiska programmet bara siktar på 500-1000 års livslängd för en kopparkapsel har man valt tunnväggigare materiäl. Man räknar heller inte med att reducerande förhållanden hunnit utbildas efter så kort tid, utan kopparundersökningarna är mer inriktade på att bestämma korrosionshastigheten för koppar tillsammans med bentonit i syre och sulfidhaltigt vatten. För en tunnväggig kapsel blir inverkan av α -radiolys på korrosionen av större betydelse och undersökningar av kopparkorrosion under γ -bestrålning kommer att utföras. Dessutom pågår undersökningar av spaltkorrosion och gropfrätning på koppar.

Undersökningarna av koppar är givetvis mycket intressanta från svensk utgångspunkt. Visserligen är den kanadensiska kopparkapseln tänkt som en betydligt mer kortlivad kapsel än den svenska, men information om t ex inverkan av radiolys på korrosionen är väsentlig för att optimera väggtjockleken på den svenska kapseln.

Som alternativ till titan för tunnväggiga korrosionsbeständiga kapslar studerar man i det kanadensiska programmet också nickelbaslegeringarna Inconel 625 och Hastelloy C276. Liksom för titan har man koncentrerat sig på undersökningar av lokal korrosion, i första hand spaltkorrosion och gropfrätning.

Av de keramiska materialen har man två alternativa materialtyper: dels beständiga högkvalitetskeramer, dels billiga keramer med enkel och väletablerad tillverknings teknik. Utifrån kriterier som beständighet i

grundvatten (uppmätt genom olika lakprov), kostnad, tillgänglighet på råvara, tillgänglig tillverknings teknik och mekaniska och fysikaliska egenskaper, har man sållat fram några alternativa keramer för ytterligare studier. Dessa keramer är: Al_2O_3 , MgO-stabiliserad ZrO_2 , cermet (70% Al_2O_3 - 30% TiC), TiO_2 , grafit, porslin och betong.

I det svenska programmet är fortfarande keramer, i första hand Al_2O_3 , intressanta alternativa kapselmateriäl. De kanadensiska undersökningarna är därför av direkt intresse, i synnerhet som Kanada för närvarande är det enda land som aktivt studerar keramiska kapselmateriäl.

Schweiz

Inom ramen för det schweiziska Project Gewähr har NAGRA utvärderat stål (gjutstål, tysk standard GS-40 och GGG40) som kapselmateriäl för ett förvar på ca 1 200 m djup i granitiskt berg /3.6.10/. Den tänkta livslängden för stålkapseln, vid en maximal förvarstemperatur på 150°C, är ca 1 000 år. Urvalet är baserat på en sällning av ett större antal tänkbara kapselmateriäl /3.6.11, 3.6.12/. I /3.6.11/ sållades fyra alternativa materiäl fram, de två ovan nämnda stålsorterna samt Ti-12 och Zircaloy-2, för mer omfattande utvärdering /3.6.12/, varefter slutligen stål valdes som första alternativ.

Förhållanden i förvaret är, som i Sverige, tänkta att vara syrefria, men med en högre salthalt (total salthalt 15 000 ppm) än vad som förutses för svenska förhållanden. De fortsatta studierna av stålkorrosion har därför koncentrerats på undersökningar av väteproducerande korrosion under syrefria förhållanden /3.6.13/.

Eftersom stål är ett alternativt materiäl för en mer kortlivad kapsel även för Sverige, och schweiziska förhållanden är relativt lika de svenska, har dessa undersökningar och resultat direkt tillämpning för svensk del.

Även Al_2O_3 har undersökts som kapselmateriäl i det schweiziska programmet. Liksom i de svenska undersökningarna har man kommit till slutsatsen att, även om Al_2O_3 har en mycket god kemisk beständighet i granitiska grundvatten, kommer risken för fördröjt brott att göra bedömningar av livstiden osäkra /3.6.14/. Detta kommer att vara det viktigaste problemet att lösa för eventuella fortsatta undersökningar av keramer som kapselmateriäl.

Storbritannien

Det brittiska programmet är koncentrerat på utvärdering av både allmän korrosion och lokal korrosion på stål i granitiskt förvar. Arbetet utförs på AERE Harwell som är huvudlaboratorium för EG-samarbetets undersökningar av stålkorrosion i granitisk miljö /3.6.2, 3.6.15, 3.6.16/.

En utgångspunkt för de brittiska undersökningarna har varit att för ett korroderande materiäl, som stål, måste de data på korrosionshastigheter som uppmäts kompletteras med en förståelse för de fenomen som styr korrosionen över längre tider. Man har därför, vid sidan av experimentella studier av allmänkorrosion och lokal korrosion, också börjat utveckla prediktiva

modeller för de olika formerna av korrosion på stål i förvarsmiljö /3.6.17, 3.6.18/. Ännu så länge över-skattar modellerna den faktiska korrosionen. Detta beror i huvudsak på att de nuvarande modellerna inte tar hänsyn till att ansamling av fasta korrosionsprodukter, framförallt vid lokal korrosion, kan hämma reaktionshastigheten. Arbete med att ta in dessa effekter i modellerna pågår /3.6.16/.

Det brittiska programmet är mycket intressant för Sverige. De data som hittills samlats är relevanta för ett svenskt granitiskt förvar med en alternativ kort-livad kapsel för isolering av avfallet. Modellutvecklingen är dessutom mycket värdefull, då man på ett tidigt stadium samordnat den med den experimentella delen av programmet. Även om viss utveckling av korrosionsmodeller också förekommer, bl a i USA, förefaller Harwell vara mest framgångsrika hittills. Trots att modellerna än så länge måste anses vara mycket konservativa tycks man ha tagit hänsyn till de väsentliga fenomen som styr korrosionen.

USA

Liksom för bränslestudierna är de amerikanska korrosionsundersökningarna kopplade till de olika förvarorienterade projekten. Av dessa har saltprojektet (SRP), tuffprojektet (NNWSI) och basaltprojektet (BWIP) kommit längst. Av dessa är förvarsmiljön i saltprojektet inte relevant för Sverige, även om de för korrosionsbedömningar i många fall kan betraktas som ett konservativt fall jämfört med förhållandena i ett granitiskt förvar. Både tuff och basalt representerar däremot förvar med grundvattenförhållanden som är lika de svenska, med det undantaget för tuff-förvaret att detta ligger över grundvattennivån och att man alltså har oxiderande förhållanden i förvaret. Gemensamt för samtliga de amerikanska projekten är att kapseln skall dimensioneras för livstider på 300 – 1 000 år.

Tuff

Huvudansvaret för korrosionsstudierna för NNWSI ligger på Lawrence Livermore Laboratory. Referensmaterialiet för kapseln är austenitiskt rostfritt stål och laboratorieinsatserna har koncentrerats på 304L (och 316L), som i industriella tillämpningar visat sig ha god korrosionsbeständighet under oxiderande förhållanden /3.6.19/. På dessa material har man studerat allmänkorrosion, olika former av lokal korrosion och inverkan av γ -radiolys /3.6.20, 3.6.21/.

Eftersom rostfritt stål för närvarande inte betraktas som ett alternativt kapselmateriale för Sverige, och undersökningarna avser oxiderande förhållanden, är de endast av marginellt svenskt intresse.

Sedan något år tillbaka pågår vid Lawrence Livermore Laboratory parallella studier av koppar och kopparlegeringar som alternativa kapselmateriale för ett tuffförvar /3.6.22/. Även om undersökningarna avser oxiderande förhållanden, och koppar-nickellegeringar bedöms som mest lovande, är dessa studier uppenbart av relativt stort svenskt intresse, eftersom de kan ge data som kompletterar de svenska undersökningarna.

Basalt

I basaltprojektet (BWIP) är referensmaterialiet för kapsel kolstål. Temperaturen kan tänkas vara så hög som 250°C och laboratorieundersökningarna utförs i allmänhet vid referenstemperaturerna 150°C och 250°C. I huvudsak studeras allmänkorrosion även i närvaro av bentonit och med eller utan γ -bestrålning /3.6.23, 3.6.24/.

Liksom för NNWSI har BWIP sedan något år tillbaka också tagit med studier av koppar och kopparlegeringar i sitt program.

Stålundersökningarna, men i första hand kopparstudierna, är givetvis intressanta för Sverige som komplement till egna och andras undersökningar av dessa material, även om de mycket höga temperaturerna (250°C) gör att resultaten kan vara svåra att överföra till svenska förhållanden.

3.7 BUFFERT OCH ÅTERFYLLNAD

I KBS forsknings- och utvecklingsprogram har de fysikaliska och kemiska egenskaperna hos smektitrika leror uppmärksamats. Dessa material bedöms som intressanta att användas som buffertmateriale i slutförvar för använt kärnbränsle.

Liknande bedömningar för dessa material har gjorts i flera andra länder t ex Kanada, Schweiz, Frankrike m fl.

Kanada

I kanadensiska koncept för slutförvar i kristallint berg finns alternativ framtagna, vilka innebär att man i berggrum på 500 – 1000 m djup placerar kapslar innehållande använt kärnbränsle i borrhål eller direkt i berggrummen. Därefter återfyller man med buffertmateriale bestående av lera och t ex sand. De leror som undersöks är natriumbentonit och några illitiska leror.

Inverkan av temperaturer på upp till 150°C och av vattenkemi studeras, samt även hur de tekniska egenskaperna ändras med tiden.

Schweiz

NAGRA har med redovisningen av sitt Project Gewähr (1985) visat hur högaktivt avfall kan slutförvaras med bl a högkompakterad bentonit som betydelsefull teknisk barriär mellan järnkapsel och berg i en fullortsborrad tunnel. I det schweiziska programmet ingår samma referensmateriale som KBS använde, Volclay Mx80. Egenskaper rörande svällning, hydraulisk konduktivitet och diffusion har också undersökts för bavariska kalciumbentoniter. Beroende av högre initialtemperatur i berg på aktuellt djup, ca 1200 m, samt tjockare buffertmaterialelager, uppgår temperaturen i det schweiziska lagret till 150°C. Fortsatt forskning rörande de tekniska barriärerna avser bl a samverkan mellan järn och bentonit, vattenupplagring och gastransport i bentonit samt egenskaper i bentonit/kvartssandblandningar /3.7.1/. Schweizisk forskning rörande kopplade fysikaliska och kemiska processer i järn/bentonitsystemet bedöms i framtiden kunna komplettera vår kunskap.

Frankrike

I det franska programmet ingår CEA studier av tekniska barriärer för HLW-glas. Samarbete har inletts, varvid jämförelser avses kunna ske med franska smektitrika naturliga leror, deras reologi, mikrostruktur samt möjliga effekter på grund av termisk påverkan med och utan strålning. Fältförsök i Stripa ingår, där högkompakterad lera i kontakt med järn provas vid temperaturer upp till 170°.

INTERNATIONELL SAMVERKAN

I SKBs FoU-arbete deltar Professor Roland Pusch, vars forskning sedan många år varit inriktad på bl a jordmaterials mikrostruktur och hur vatten inverkar på denna. I arbetet för SKB har egenskaper mätts hos lerbaserade buffertmaterial av betydelse för fysikaliska processer i slutförvarsmiljö. Häri ingår samverkan mellan smektitmineral och vatten som i hög grad inverkar på reologin för systemet lera/vatten. För djupare förståelse för dessa processer, vilka har stor betydelse för bl a långtidseffekter, sker internationell samverkan med framstående vetenskapsmän bl a genom av SKB stödd verksamhet med internationell publicering. Sedan flera år finns samarbete med institutioner i bl a USA, Frankrike, Belgien och Norge. Det är med dels ytterligare förvärvad kunskap om sammanhangen mineral/vatten i mikrostruktur, dels med geoteknisk och geologisk erfarenhet som tekniska barriärer skall konstrueras och funktionsvärderas. Det internationella samarbetet i Stripa är ett bra exempel på kunskapsuppbyggande verksamhet. Ett buffertmaterialförsök är avslutat. Schakt och borrhålspluggningsteknik prövas och tätinjekteringsförsök planlägges.

För en inledande etapp planeras en "state-of-art"-redovisning av ett par intressanta tätningsmaterials långtidsstabilitet. Redovisningen kommer att genomföras som ett internationellt samarbete inom Stripa-projektet.

3.8 UTFORMNING AV FÖRVAR

Slutförvar för högaktivt avfall eller använt bränsle planeras bli utförda i flera länder med olika förutsättningar från geologisk synpunkt, t ex i saltformationer, sediment med bl a tät lera samt i kristallint berg.

På grund av svenska förhållanden är intresset fokuserat på kristallint berg.

USA

Mål för funktion hos systemet av tekniska barriärer finns fastlagd, nämligen inneslutning av radionuklider under minst 300 år och tillåtet utsläpp upp till 1 000 år med högst 10^{-5} av det ursprungliga totala innehållet per år. Medlen för att uppnå dessa mål utgörs bl a av "avfallspaket", bestående av kapsel med lämpligt yttre kompletterande material, placerade i borrhål utförda från berggrum vilka har schaktkommunikation med markytan. Borrhålen pluggas med t ex betong och berggrum och schakt återfylls.

Konstruktionsarbetet är i ett tidigt inledande skede, men tidsplanen innebär att ett pilotschakt kommer att sänkas under 1990-talet.

Likheter mellan de geologiska förutsättningarna gör att utvecklingen mot mer detaljerad utformning är av intresse. Detta gäller också val av dimensionerande temperatur för kapsel, återfyllning och berg /3.8.1/.

Kanada

Utformningen av ett kanadensiskt slutförvar karakteriseras av horisontella berggrum med tre rader borrhål i golvet, i vilka kapslar placeras tillsammans med buffertmaterial. Berggrum, tunnlar och schakt återfylls. Tätningsåtgärder i form av pluggar i schakt samt injekteringar m m förutses. Likheter i geologiska förutsättningar, kapselmateriell och temperaturförhållanden möjliggör för oss intressanta jämförelser i konstruktiva utformningar, innefattande val av förläggningsdjup och lämplig utformning för tillämpad återfyllningsteknik.

Schweiz

Det schweiziska konceptet till utformning av slutförvar för HLW som presenterats /3.8.2/ bygger på fullhålsborrade tunnlar med 3.7 m diameter fyllda med järnkapslar och högkompakterad bentonit. Två vertikala schakt utgör förbindelse med markytan.

Likheter i val av buffertmaterial, egenskaper hos ett förvarssystem på stort djup samt tillämpningen av bergteknik för fullhålsborrning av tunnlar i hårt kristallint berg innebär intressanta möjligheter till jämförelser.

Frankrike

Utformningen av tekniska barriärer i vertikala borrhål med många avfallsenheter i varje hål pågår med visst samarbete mellan CEA och SKB.

INTERNATIONELL SAMVERKAN

Inom Stripa-projektet prövas bl a metoder för pluggning av borrhål, schakt och tunnlar. Pluggarnas funktion är beroende av samverkan med berget, vilket avses bli visat i Stripa-testerna. Systemet av pluggar i borrhål, schakt och tunnlar skall samverka, så att grundvattenströmningen i möjligaste mån förhindras i avfallens närhet. I framtiden är det av intresse att utveckla metoder för att karakterisera berggrundens geohydrologiska förhållanden i samband med att förvaret byggs, så att anpassning av förvarsutformning och planering av tätningsåtgärder kan ske. Det är därför av stort intresse att delta i pilotprojekt, för t ex sänkning av schakt, där tillämpning av geohydrologisk karakterisering under realistiska betingelser ingår.

3.9 BIOSFÄRSSTUDIER

3.9.1 Allmänt

I en potentiell transportkedja för radioaktiva ämnen från ett avfallsförvar till människan utgör biosfären den sista länken. I allmänhet betraktas biosfären som det system av grundvatten, mark, ytvatten och atmosfär som innehåller levande organiskt material eller som är direkt tillgängligt för människan att använda eller konsumera. Transport och förekomst av radionuklider påverkas, dels av vattnets och atmosfärens rörelser och nuklidernas diffusion eller sedimenta-

tionen i dessa medier, dels av de organiska eller biologiska omsättningsprocesserna i mark och vatten.

Genom selektivt upptag i biota och via biologiska näringskedjor kan anrikningar av vissa ämnen uppstå i det organiska materialet. För vissa radioaktiva ämnen dominerar konsekvenserna för människan, av ett utsläpp från ett slutförvar, av en speciell näringskedja.

Studiet av nuklidens omsättning i biosfären har sedan länge pågått i alla kärnkraftländer, för att ge underlag till konsekvensberäkningar av utsläpp vid normaldrift och haverier i kärntekniska anläggningar. Problematiken kring tungmetaller har också krävt kartläggningar av den nuklidspecifika spridningen i biosfären. Det mesta materialet inom området är publicerat och fritt tillgängligt i den öppna litteraturen.

Vid lokala utsläpp av radionuklider till biosfären koncentreras intresset i hög grad på den primära biosfärrecipienten. För ett slutförvar djupt i berggrunden utgörs denna av grundvattenutflöden i de topografiska lågpunkterna eller av dricksvattenbrunnar. Utflödets kemiska karaktär bestäms till stor del av förvarsbergarter.

SKB har ett väl fungerande informationsutbyte inom biosfärsområdet med bl a Kanada. Det kanadensiska slutförvarssystemet och de geologiska förhållandena kring det tycks komma att väl överensstämma med det svenska.

Spridningen från recipienter vidare ut i biosfären uppvisar stora regionala och klimatiska olikheter. Takten av förändringar i spridningsförhållanden är snabb jämfört med varaktigheten av eventuella läckage från förvaret. Plats och klimatspecifika data från olika delar av världen är således främst intressanta för att karakterisera variationsbredden i biosfärspridningen.

Inga direkta samarbetsprojekt med utländska grupper avses bli initierade inom detta område. Dock avser SKB att stödja och medverka i att en skandinavisk databas byggs upp för biosfärsdata.

Ett internationellt samarbete har initierats av SSI för att testa de konceptuella och matematiska modeller som beskriver transport och ansamling av radionuklider, eller andra spårämnen i ekologiska system, för att fastställa de omgivningsmässiga konsekvenserna av eventuella utsläpp. Ett tjugotal organisationer har visat intresse att delta med olika modeller. Från Sverige deltar bl a Studsvik Energiteknik med modellen BIOPATH som SKB använt i sina säkerhetsanalyser.

3.10 SÄKERHETSANALYS

3.10.1 Allmänt

Man kan spåra ett antal nya internationella utvecklingstrender inom säkerhetsanalysområdet. Dessa innebär i korthet en uppstramning och formalisering av analysarbetet. Begreppet säkerhetsanalys har vidgats till att omfatta de flesta typer av bedömningar och beräkningar, vad gäller funktionen hos olika delar av förvaret, och har döpts om till funktionsanalys.

Detta betyder att en ökad grad av realism och tilltro till beräkningsresultat eftersträvas. Medlen att nå detta är bl a osäkerhetsanalys, känslighetsanalys, verifiering och validering av beräkningsmodeller samt införande av kvalitetssäkringsrutiner i programutvecklingsarbetet.

3.10.2 Nationella och internationella insatser

De trender som beskrivits ovan avspeglas bl a i de internationella studier för verifiering och validering av beräkningsmodeller för geohydrologi och nuklid-spridning i förvarets när- och fjärrområden som igångsatts och drivs i NEAs regi: INTRACOIN, HYDROCOIN och INTRAVAL. Liknande verksamhet har också inletts vad gäller ekologiska modeller genom BIOMOVs-studien.

Möjligheterna att ta hänsyn till osäkerheter i indata och att göra känslighetsanalyser, för att identifiera viktiga parametrar för optimering av förvarsutformningen eller för att peka på behov att minska osäkerheterna i indata, är viktiga. Dessa har ökat genom utvecklingen av en typ av program som först togs fram vid AECL (SYVAC). Dessa använder sig av en probabilistisk teknik på så sätt att indata får representeras av sannolikhetsfördelningar, från vilka värden tas genom stickprov (Monte Carlo), som sedan används för en kopplad kedja av modeller som beskriver radionuklidernas utbredning. Kvalitetssäkringsrutiner har använts vid utvecklingen av senare versioner av SYVAC. Metoder för känslighetsanalys som används idag är i stor utsträckning baserade på arbete som gjorts för USNRC vid Sandia Laboratories.

Framgångarna med SYVAC och Sandias metodiker har lett till att flera andra länder och organisationer ägnar sig åt utveckling av liknande programsystem: förutom SKB även EG, UKDOE och CEA. NAGRA och Institut für Tieflagerung (IfT) har visat stort intresse. Verksamhet pågår fortfarande i USA men mindre sammanhållet än i Europa. Genom NEA, Users' Group for Probabilistic Systems Assessment Codes for Radioactive Waste Management, deltar f n SKB, AECL, JRC-Ispira, CEN/SCK och UKDOE i en internationell arbetsgrupp, i vilken man nu börjat skissera aktiviteter för verifiering av SYVAC-liknande programsystem.

3.10.3 Information utifrån

Målsättningarna med funktionsanalysverksamheten är så pass skilda i olika länder, liksom kravspecifikationerna på programmen och programsystemen, att information eller produkter inte direkt kan lyftas över och användas av SKB på svenska förhållanden. Det betyder naturligtvis inte att man skall sluta följa den internationella verksamheten. De främsta källorna till information är ändå den öppna speciallitteraturen inom områden som statistik, numerisk analys, kvalitetssäkring av programvara m m. Man måste ändå räkna med att SKB behöver bedriva ett visst anpassnings- och vidareutvecklingsarbete även på dessa områden.

4 INTERNATIONELLT SAMARBETE

4.1 ÖVERSIKT

Samarbete och utbyte av information med omvärlden är en omfattande del av SKBs forskningsverksamhet.

Arbetet bedrivs på följande sätt:

- Deltagande i arbetsgrupper i etablerade internationella organ.
- Egna bilaterala, tekniska samarbetsavtal.
- Deltagande vid internationella konferenser och symposier.
- Medverkan inom internationella projekt avseende hantering eller förvaring av radioaktivt avfall. (Exempel STRIPA- och HYDROCOIN-projekten).

4.2 INTERNATIONELLA ORGAN

SKB har under de senaste åren aktivt samarbetat med i huvudsak följande två internationella organisationer:

- a) IAEA
- b) OECD/NEA

Inom IAEA har SKB antingen direkt eller genom sina konsulter deltagit i intressanta delar av forskningsprogrammet. Under programrubriken kärnbränslecykeln (Nuclear Fuel Cycle) har SKB deltagit i två olika programdelar, nämligen:

- Avfallshantering (Waste Management).
- Hantering av använt kärnbränsle (Spent Fuel Management).

Målet med arbetet under programdelen "Waste Management" är att utvärdera, sprida och stödja framtagandet av information angående hantering och behandling av radioaktivt avfall i alla former, så att skyddet för människan och hennes miljö ur dessa aspekter kan säkerställas i ett långtidsförlopp.

Den andra programdelen "Spent Fuel Management" syftar till att samla och utbyta information angående metoder för hantering, transport och lagring av använt kärnbränsle.

Under programrubriken fysikaliska vetenskaper (Physical Sciences) har samarbetet i första hand rört programdelen Isotophydrologi (Isotope Hydrology).

Målet för denna programdel är att ta fram och förфина modeller för transport av olika nuklider samt att uppmuntra användningen av dessa modeller vid geohydrologiska och geokemiska undersökningar, t ex av typen:

- rörelser hos grundvatten,
- bedömningen av geotermiska resurser,
- rörelser och transport av sediment,
- geohydrologiska platsundersökningar för avfalls-lager,

En av OECD/NEAs huvudområden för samarbete är det radioaktiva avfallens hantering i medlemsländerna. Frågan handläggs av Radioactive Waste Management Committee (RWMC) där även SKB är representerat genom Tönis Papp. Samarbetet bedrivs genom att vissa arbeten genomförs i gemensamma internationella projekt och att arbetsgrupper bildas för att underlätta informationsutbyte eller ta fram gemensamt besluts- eller samordningsunderlag.

Seminarier och workshops arrangeras inom viktiga områden för att dokumentera och diskutera utvecklingsläge och framtida arbetsinriktning.

Nedan förtecknas de grupper och projekt inom området för radioaktivt avfall där SKB deltar med personal eller finansiering.

Grupper

- *PAAG* (Performance Assessment Advisory Group) är rådgivande till RWMC i frågor rörande samarbetet rörande medel och metoder för funktions- och säkerhetsanalyser av slutförvaringssystem.

Medlem från SKB är Tönis Papp (ordförande).

- *Advisory Group on In Situ Research and Investigations* är rådgivande till RWMC i frågor rörande försöksverksamheten i de olika underjordiska försöksstationerna.

Medlem från SKB är Bengt Stillborg.

- *PSAC* (Probabilistic Safety Assessment Code) Uses Group utgör en samarbetsgrupp mellan de som utvecklar och använder matematiska modeller för probabilistiska analyser av förvarssystem. Huvudvikten ligger vid att samordna utvecklingen och jämföra kvaliteten på modellerna.

Medlem från SKB Nils Kjellbert.

- *Cooperative Program for the Exchange of Scientific and Technical Information Concerning Nuclear Installations Decommissioning Projects* utgör ett forum för informationsutbyte och eventuellt samarbete om olika nedläggnings- och rivningsprojekt i världen.

Medlem från SKB är Hans Forsström. SKB finansierar vidare en programkoordinator Shankar Menon, Studsvik Energiteknik AB.

Projekt

- *Stripa* – se avsnitt 7.3. Projektchef och ansvarig för projektadministrationen är Bengt Stillborg.

Medlemmar från SKB är P-E Ahlström (ordf i Joint Technical Committee) och Bengt Stillborg (projektchef).

- *ISIRS*, International Sorption Information Retrieval System bygger upp en databas och utgör ett informationscentrum inom rubricerade område för nuklider av intresse inom avfallsområdet.

Medlem är Bert Allard, ULi, finansierad genom SKB.

- *NEAs Chemical Thermodynamic Data Base System* analyserar och kvalitetskontrollerar grunddata för väsentliga nuklider för uppbyggnad av en databas. Svenska deltagare är Bert Allard, ULi och Ingmar Grenthe, KTH, finansierade genom SKB.

NEA arrangerar därutöver 3 à 4 Workshops varje år inom forsknings- och utvecklingsområdet där SKBs personal eller konsulter aktivt deltar.

En likartad verksamhet till RWMC pågår i Fuel Cycle Committee (FCC) där kärnbränslecykelfrågor handläggs, i Committee for Safety of Nuclear Installations (CSNI) där drifttekniska säkerhetsfrågor handläggs och i Committee on Radiation Protection and Public Health (CRPPH) där radiologiska säkerhetsfrågor handläggs. SKB följer verksamheten även i dessa kommittéer.

4.3 BILATERALT SAMARBETE

För närvarande har SKB formella bilaterala avtal med följande länder:

- USA – DOE.
- Kanada – AECL.
- Schweiz – NAGRA.
- Frankrike – CEA.
- EG – EURATOM.

Informationsutbyte utan formella avtal finns dessutom med:

- Västtyskland.
- Belgien.
- Storbritannien.
- Japan.
- Övriga nordiska länder.

De formella avtalen ovan är likartade till sin uppbyggnad och täcker informationsutbyte och samarbete inom hantering, behandling, lagring och slutförvaring av radioaktivt avfall. Utbyte av aktuell information (rapporter) samt resultat och metoder från forskning och utveckling är huvudpunkter i avtalen. Anordnande av gemensamma seminarier och korta besök av specialister till andra partens anläggningar är andra exempel på vad som ryms inom avtalens ram. Regelbundet, med ca ett års intervall och växelvis i respektive land, sker allmänna genomgångar av parternas avfallsprogram och verksamhetsplanering inom avtalens ram.

Vid utbyte av personal under längre tidsperioder eller omfattande direkt projektsamarbete sluts i regel särskilda avtal inom det allmänna avtalets ram.

Genom avtalen ges specialister inom kärnavfallsområdet ökade möjligheter till kontakter för ett givande utbyte av aktuell information. Detta är, som tidigare nämnts i kapitel 3, särskilt värdefullt eftersom man internationellt idag satsar stora summor på forskning inom kärnavfallsområdet.

REFERENSER

CHAPTER 2

- 2.2.1.1 Atomwirtschaft, März 1986 p 154
- 2.2.1.2 STEIN, R
The United States Geologic Repository Program: An Overview
International symposium on the siting, design and construction of underground repositories for radioactive wastes. Hanover, Federal Republic of Germany, 3-7 March 1986.
IAEA-SM-289/1.
- 2.2.1.3 Spent fuel and radioactive waste inventories, projections and characteristics. Rev. 1.
DOE/RW-0006-Rev 1. (Dec 1985).
- 2.2.1.4 Public Law 97-425 – January 7, 1983, “Nuclear Waste Policy Act of 1982”.
- 2.2.1.5 Public Law 96-573 (1980)
“Low-level Radioactive Waste Policy Act of 1980”.
- 2.2.1.6 Nuclear News, February 1986, p 64.
- 2.2.1.7 U.S. Nuclear Regulatory Commission
Disposal of High-Level Radioactive Wastes in Geologic Repositories. Technical Criteria 10 CFR Part 60, June 21, 1983.
- 2.2.1.8 U.S. Environmental Protection Agency
Environmental Standards for the Management and Disposal of Spent Nuclear Fuel, High-Level and Transuranic Radioactive Wastes. 40 CFR Part 191, Sept 19, 1985.
- 2.2.1.9 U.S. Department of Energy
General Guidelines for the Recommendation of Sites for the Nuclear Waste repositories, Final Siting Guidelines. 10 CFR Part 960, December 6, 1984.
- 2.2.1.10 U.S. Nuclear Regulatory Commission
Licensing Requirements for Land Disposal of Radioactive Waste.
NUREG-0945 (1983).
- 2.2.1.11 U.S. Department of Energy
Mission Plan for the Civilian Radioactive Waste Management Program.
DOE/RW-0005 (June 1985).
- 2.2.1.12 Recent Development in Radioactive Waste Management in the United States.
Report Presented by the U.S. Delegation to the NEA Radioactive Waste Management Committee, December, 1985.
- 2.2.1.13 Nuclear Waste News, September 19, 1985 p 230.
- 2.2.1.14 Nuclear Fuel, January 27, 1986 p 9.
- 2.2.1.15 Atomic Energy – Clearing House
Volume 32 January 6, 1986 p 11.
- 2.2.1.16 Nucleonics Week, May 2, 1985 p 4.
- 2.2.1.17 Nucleonics Week, March 6, 1986 p 2.
- 2.2.1.18 LAKEY, L T, HARMON, K M and COLOMBO, P
Management of Low-level Radioactive Waste around the World.
PNL-5173 (1985).
- 2.2.2.1 Atomwirtschaft, März 1986 p 154.
- 2.2.2.2 NUKEM Special Report 9/85.
- 2.2.2.3 NUMARK, N J, MATTSON, R J, GAUNT, J
Comparison of national programs and regulations for the management of spent fuel and disposal of high-level waste in seven countries.
Waste Management 86, Tucson, Arizona, March 1986.
- 2.2.2.4 How Canada has controlled the spent fuel storage problem.
Nuclear Engineering Int. February 1985 p 23.
- 2.2.2.5 AECB (Atomic Energy Control Board)
Deep Geological Disposal of Nuclear Waste: Background Information and Regulatory Requirements Regarding the Concept Assessment Phase, Regulatory Document R-71 (1985).
- 2.2.2.6 Technical Advisory Committee on the Nuclear Fuel Waste Management Program.
Sixth Annual Report, July 1985.
- 2.2.2.7 LYON, R B
Status of the Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program.
AECL-8395 (October 1985).
- 2.2.2.8 New Development in Radioactive Waste Management in Canada.
Report to NEA Radioactive Waste Management Committee, December 1985.

- 2.2.2.9 WHITAKER S H, DAVISON C C, DORMUTH K W**
The Canadian approach to site characterization for a nuclear fuel waste disposal vault. International symposium on the siting, design and construction of underground repositories for radioactive wastes, Hanover, Federal Republic of Germany, 3-7 March 1986.
IAEA-SM-289/33.
- 2.2.2.10 Nuclear Waste News, March 13, 1986 p 68.**
- 2.2.2.11 HANCOX W T**
Radioactive Waste Management in Canada. International symposium on the siting, design and construction of underground repositories for radioactive wastes, Hanover, Federal Republic of Germany, 3-7 March 1986.
IAEA-SM-289/2.
- 2.2.2.12 UTTALL K, CHADA J A, CARMICHAEL, T J**
Engineered barrier research in Canada. International symposium on the siting, design and construction of underground repositories for radioactive wastes, Hanover, Federal Republic of Germany, 3-7 March 1986.
IAEA-SM-289/21.
- 2.2.2.13 WUSCHKE D M et al.**
Environmental and Safety Assessment Studies for Nuclear Fuel Waste Management. AECL-TR-127-3 (1981).
- 2.2.2.14 WUSCHKE D M, GILLESPIE P A, MAIN D E**
Second Interim Assessment of the Canadian Concept for Nuclear Fuel Waste Disposal. AECL-8373 (1985).
- 2.2.2.15 NATHWANI J S**
Safety assessment of a conceptual design of a facility for geological disposal of CANDU nuclear fuel in the Canadian shield. International symposium on the siting, design and construction of underground repositories for radioactive wastes, Hanover, Federal Republic of Germany, 3-7 March 1986.
IAEA-SM-289/25.
- 2.2.3.1 Atomwirtschaft, März 1986 p 154.**
- 2.2.3.2 HARMON K M, JOHNSON Jr A B**
Foreign programs for the storage of spent nuclear power plant fuels, high-level waste canisters and transuranic wastes. PNL-5089 (1984).
- 2.2.3.3 BARTHOUX A**
Final Disposal of HLW in France
Nuclear Europe 2/1985 p 31.
- 2.2.3.4 Atomwirtschaft, März 1985 p 118.**
- 2.2.3.5 LAKEY L T, HARMON K M, COLOMBO P**
Management of low-level radioactive wastes around the world.
PNL-5173 (1985).
- 2.2.3.6 SCSIN (Service Central de Sûreté des Installations Nucléaires)**
Règle fondamentale de sûreté
MRI/SCSIN, June 19, 1984.
- 2.2.3.7 EDF expects long-term savings from Pu and U recycle in LWRs.**
Nuclear Fuel June 17, 1985 p 8.
- 2.2.3.8 DELANGE M**
Development, experience and innovation in reprocessing.
RGN No 6 (1985) p 559.
- 2.2.3.9 LIEGEOIS E**
La Hague, le plus grand chantier d'Europe.
Energie nucléaire Aout 1984, p 16.
- 2.2.3.10 DAMIETTE G et al.**
Vitrification of High-Level Radwaste in France
Nuclear Europe 2/1985 p 11.
- 2.2.3.11 Les fait saillant de la R&D en France (période 1984-85).**
Réunion du Radioactive Waste Management Committee, Paris 5-6 Décembre 1985.
- 2.2.3.12 DERLICH S**
Etudes géologiques fondamentales pour le choix des milieux de stockages. Colloque international sur le choix des sites, la conception et la construction des dépôts souterrains pour les déchets radioactifs.
Hanovre, République fédérale d'Allemagne, 3-7 mars 1986.
IAEA-SM-289/35.
- 2.2.3.13 HOORELBEKE J U et al.**
Stockage des déchets nucléaires en formations géologiques profondes; études conceptuelles.
Colloque international sur le choix des sites, la conception et la construction des dépôts souterrains pour les déchets radioactifs.
Hanovre, République fédérale d'Allemagne, 3-7 mars 1986.
IAEA-SM-289/48.

- 2.2.3.14 BATHOUX A, MARQUE Y**
Le stockage de surface des déchets radioactifs le system francais. Colloque international sur le choix des sites, la conception et la construction des depots souterrains pour les déchets radioactifs.
Hanovre, République fédérale d'Allemagne, 3-7 mars 1986.
IAEA-SM-289/4.
- 2.2.3.15 Nucleonics Week, January 16, 1986, p 15.**
- 2.2.4.1 Atomwirtschaft, März 1986 p 154.**
- 2.2.4.2 NUMARK N J, MATTSON R J, GAUNT J**
Comparison of national programs and regulations for the management of spent fuel and disposal of high-level waste in seven countries.
Waste Management 86, Tucson, Arizona, March 1986.
- 2.2.4.3 MELLINGER P J, HARMON K M, LAKEY L T**
A summary of nuclear fuel reprocessing activities around the world.
PNL-4981 (1984).
- 2.2.4.4 Die Situation der Endlagerung**
PTB Info-Blatt 1/85.
- 2.2.4.5 Managing waste in West Germany**
Nuclear Engineering Int. March 1985 p 16.
- 2.2.4.6 KÜHN K et al.**
Forschung für die Endlagerung radioaktiver Abfälle
Atomwirtschaft Oct 1985 p 512.
- 2.2.4.7 Der Bundesminister des Innern**
Bekanntmachung von Empfehlungen der Reaktor-Sicherheitskommission. Sicherheitskriterien für Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk.
Bundesanzeiger Nr 2 (1983) p 45.
- 2.2.4.8 MERZ E, KUHN K, BLOSER M**
Implementation of the federal republic of Germany's policy and strategy of radioactive waste disposal.
International symposium on the siting, design and construction of underground repositories for radioactive wastes.
Hanover, Federal Republic of Germany, 3-7 March 1986.
IAEA-SM-289/6.
- 2.2.4.9 SCHEUTEN G H**
Die deutsche Wiederaufarbeitungsanlage atomwirtschaft Juli 1985 p 362.
- 2.2.4.10 NUKEM Market Report 10/85 p 7.**
- 2.2.4.11 Nucleonics Week, April 4, 1985 p 6.**
- 2.2.4.12 Atomwirtschaft, Jan 1986 p 8.**
- 2.2.4.13 Final disposal of radioactive waste.**
PTB aktuell no 9, October 1985.
- 2.2.4.14 Atomwirtschaft, Mai 1985 p 224.**
- 2.2.4.15 Das nukleare Entsorgungskonzept der Bundesrepublik Deutschland.**
Atom + Strom 32 (1986) Heft 1 p 17.
- 2.2.4.16 Systemstudie Andere Entsorgungstechniken, Abschlussbericht Hauptband.**
Kernforschungszentrum Karlsruhe (Dez 1984).
- 2.2.4.17 CLOSS K D et al.**
Technik der Direkten Endlagerung abgebrennter Brennelemente.
Atomwirtschaft Aug/Sept 1984 p 459.
- 2.2.4.18 RÖTHEMEYER H**
Recent significant events in radioactive waste disposal.
Radioactive Waste Management Committee, Paris 5-7 Dec, 1985.
- 2.2.4.19 Project Sicherheit Entsorgung (PSE)**
BMFT, Bonn Jan 1985.
- 2.2.4.20 Nuclear Fuel, June 17, 1985 p 2.**
- 2.2.4.21 Nuclear Fuel, Nov 18, 1985 p 10.**
- 2.2.4.22 Atomwirtschaft, März 1985 p 118.**
- 2.2.5.1 Atomwirtschaft, März 1986 p 154.**
- 2.2.5.2 NUMARK N J, MATTSON R J, GAUNT J**
Comparison of national programs and regulations for the management of spent fuel and disposal of high-level waste in seven countries.
Waste Management 86, Tucson, Arizona, March 1986.
- 2.2.5.3 GINNIFF, M E**
Implementation of UK policy and strategy on radioactive waste disposal.
Nuclear Energy Vol 24 No 2 (1985) p 99.
- 2.2.5.4 Nuclear Waste News, Dec 5, 1985 p 304.**
- 2.2.5.5 National Radiological Protection Board**
Radiological Protection Objectives for the Disposal of Solid Radioactive Wastes NRPB-GS1 (1983).

- 2.2.5.6 **National Radiological Protection Board**
Radioactive effluents and solid wastes.
A Summary of NRPB work on standards, assessments and research.
NRPB-M123 (1985).
- 2.2.5.7 **SMITH B**
Vitrification of Sellafield wastes.
Atom 341 (1985) p 3.
- 2.2.5.8 **RIPPON S**
La Hague and Sellafield:
Progress report from Europe's two largest construction sites.
Nuclear News, June 1985 p 128.
- 2.2.5.9 **WILKINSSON W L**
High-Level Waste Management in the UK
Nuclear Europe 2/1985 p 9.
- 2.2.5.10 **Radioactive Waste Management.**
Presented to Parliament by the Secretary of State of Environment, the Secretary of State for Scotland and the Secretary of State for Wales. July 1982.
- 2.2.5.11 **GINNIFF M E, BLAIR I M**
The management and disposal of radioactive waste.
Energy World, Jan 1986 p 5.
- 2.2.5.12 **NIREX to examine four sites and choose one.**
The management and disposal of radioactive waste.
Energy World, Jan 1986 p 5.
- 2.2.5.13 **Nucleonics Week, Jan 31, 1985 p 15.**
- 2.2.5.14 **Nuclear Fuel, Oct 7, 1985 p 9.**
- 2.2.6.1 **European Conference on Radioactive Waste Management Luxembourg, April 22-26, 1985.**
- 2.2.7.1 **Atomwirtschaft, März 1986 p 154.**
- 2.2.7.2 **KÜFFER K P**
Kernenergie in der Schweiz
Atomwirtschaft Nov 1985 p 568.
- 2.2.7.3 **LAKEY L T, HARMON K M and COLOMBO P**
Management of low-level radioactive waste around the world.
PNL-5173 (1985).
- 2.2.7.4 **Richtlinie für Kernanlage Schutzziele für die Endlagerung Radioaktiver Abfälle.**
Eidg. Kommission für die Sicherheit von Atomanlagen (KSA).
Abteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (ASK).
R-21, Okt 1980.
- 2.2.7.5 **NAGRA**
Projekt Gewähr 1985
Projektbericht NGB 85-01-NGB 85-08 (Jan 1985).
- 2.2.7.6 **ISSLER**
Die NAGRA nach Projekt Gewähr 1985 – Vorbereitung und Realisierung konkreter Endlagerprojekte.
NAGRA informiert 3/85 p 33.
- 2.2.7.7 **Teilbewilligung für Sonderarbeiten zum Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle.**
NAGRA informiert 3/85 p 37.
- 2.2.8.1 **YJT**
Annual Report 1984 (1985).
- 2.2.8.2 **VUORI S**
Overview of present radioactive waste management activities in Finland.
(1985)
- 2.2.8.3 **RAUMOLIN H, TÖRMÄLÄ V-P**
Spent Fuel Storage and Disposal in Finland.
Nuclear Europe 2/1985 p 18.
- 2.2.8.4 **RYHÄNEN V, ÄIKÄS T, VUORELA P**
Site investigations for the final disposal of spent nuclear fuel in Finland.
International symposium on the siting, design and construction of underground repositories for radioactive wastes.
Hanover, Federal Republic of Germany, 3-7 March 1986.
IAEA-SM-289/39.
- 2.2.9.1 **Atomwirtschaft, März 1986 p 154.**
- 2.2.9.2 **The program for the Japanese nuclear fuel cycle and back end. Taisei Corp (1984).**
- 2.2.9.3 **NUMARK N J, MATTSON R J, GAUNT J**
Comparison of national programs and regulations for the management of spent fuel and disposal of high-level waste in seven countries.
Waste Management 86, Tucson, Arizona, March 1986.

- 2.2.9.4 **Atoms in Japan, April 1985 p 27.**
- 2.2.9.5 **Nucleonics Week, Sept 12, 1985 p 5.**
- 2.2.9.6 **Atoms in Japan, Okt 1985, p 24.**
- 2.2.9.7 **LAKEY L T, HARMON K M and COLOMBO P**
Management of low-level radioactive waste around the world.
PNL-5173 (1985).
- 2.2.9.8 **Atoms in Japan, Nov 1985, p 23.**
- 2.2.9.9 **Atoms in Japan, Mars 1985 p 4.**
- 2.2.10.1 **GAUBE E, PREVOT J**
Belgium's Nuclear Electricity Program Nuclear Europe 12/1985 p 13.
- 2.2.10.2 **Nucleonics Week, Febr 6 1986 p 12.**
- 2.2.10.3 **Atomwirtschaft, Okt 1985, p 492.**
- 2.2.10.4 **HÖHLEIN G et al.**
PAMELA: Advanced Technology for Waste Solidification
Nuclear Europe 2/1985 p 16.
- 2.2.10.5 **Nuclear Fuel Nov 18, 1985 p 10.**
- 2.2.10.6 **BONNE A A**
Clay: Evaluation of Geological Disposal of Radwaste in Belgium.
Nuclear Europe 2/1985 p 29.
- 2.2.10.7 **HEREMANS R**
Research and development in the field of conditioned radioactive waste disposal in Belgium.
ONDRAF/NIRAS (1985).
- 2.2.10.8 **DETILLEUX E**
Radioactive Waste Management in Belgium
ONDRAF/NIRAS (1984)
- 2.2.10.9 **MANFROY P et al.**
Etude preliminaire sur les possibilites d'enfouissement terrestre des dechets conditionés de faible radioactivité en Belgique. Colloque international sur le choix de sites, la conception et la construction des depots souterrains pour les dechets radioactifs.
Hanovre, République fédérale d'Allemagne, 3-7 mars 1986.
IAEA-SM-289/5.
- 2.2.10.10 **Atomwirtschaft, März 1986 p 154.**
- 2.2.10.11 **RIVERO P**
Status of Spain's Nuclear Power Plant Program.
Nuclear Europe 9/1985 p 18.
- 2.2.10.12 **Nucleonics Week, Oct 31, 1985 p 7.**
- 2.2.10.13 **LAKEY L T, HARMON K M and COLOMBO P**
Management of low-level radioactive waste around the world.
PNL-5173 (1985).
- 2.2.10.14 **NEGRONI A**
The Italian Nuclear Energy Program Nuclear Europe 1/1986 p 14.
- 2.2.10.15 **Atom 345, July 1985 p 18.**
- 2.2.10.16 **SIMEN F**
Italy's Policy on Back End of Fuel Cycle
Nuclear Europe 1/1986 p 24.
- 2.2.10.17 **MELLINGER P J, HARMON K M, LAKEY L T**
Summary of nuclear fuel reprocessing activities around the world.
PNL-4981 (1984).
- 2.2.10.18 **LAKEY L T, HARMON K M and COLOMBO P**
Management of low-level radioactive wastes around the world.
PNL-5173 (1985).
- 2.2.10.19 **NASCHI G**
Nuclear Safety in Italy
Nuclear Europe 1/1986 p 16.
- 2.2.10.20 **CHAPMAN N and GERA F**
Disposal of Radioactive Wastes in Italian Clays.
Radioactive Waste Management and the Nuclear Fuel Cycle Vol 6
No 1 (1985) p 51.
- 2.2.10.21 **CHAPMAN N et al.**
Disposal of radioactive waste in Italian argillaceous formations.
International symposium on the siting, design and construction of underground repositories for radioactive wastes.
Hanover, Federal republic of Germany, IAEA-SM-289/41.

CHAPTER 3

- 3.5.1 EINZINGER R.E. AND WOODLEY R.E.**
“Low Temperature Spent Fuel Oxidation under Tuff Repository Conditions”, Waste Management 85, Proc. of the Symposium on Waste Management, Tucson, AZ, March 24-28, 1985, p 505.
- 3.5.2 WILSON C.N.**
“Results from NNWSI Series 1 Spent Fuel Leach Test”, Report: HEDL-TME 84-70, Westinghouse Hanford Co., 1985.
- 3.5.3 OVERSBY V.M. and WILSON C.N.**
“Derivation of a Waste Package Source Term for NNWSI from Results of Laboratory Experiments”, in “Scientific Basis for Nuclear Waste Management IX”, ed. L.O. Werme, the Materials Research Society, to be published 1986.
- 3.5.4 SCHRAMKE J.A., SIMONSON S.A. and COLES D.G.**
“A Report on the Status of Hydrothermal Testing of Fully Radioactive Waste Forms and Basalt Repository Waste Package Components”, Report: SD-BWI-TI-253, Rev. O, Pacific Northwest Laboratory, Richland, WA, 1984.
- 3.5.5 GRAY W.J., McVAY G.L., BARNER J.O., SHADE J.W. and COTE R.W.**
“Evaluation of Spent Fuel As a Waste Form in a Salt Repository”, in “Scientific Basis for Nuclear Waste Management VII”, ed. G.L. McVay, North-Holland Publ. Co., 1984.
- 3.5.6 VANDERGRAAF T.T.**
“Leaching of Irradiated UO₂ Fuel”, AECL Technical Record, TR-100 (1980).
- 3.5.7 JOHNSON L.H.**
“The Dissolution of Irradiated UO₂ Fuel in Groundwater”, AECL Report, AECL-6837 (1982).
- 3.5.8 JOHNSON L.H., BURNS K.I., JOLING H.H. and MOORE C.J.**
“The Dissolution of Irradiated UO₂ Fuel under Hydrothermal Conditions, AECL Technical Record, TR-128 (1981).
- 3.5.9 JOHNSON L.H. and JOLING H.H.**
“The dissolution of Irradiated Fuel under Hydrothermal Conditions”, in “Scientific Basis for Nuclear Waste Management-IV”, ed. S.V. Topp, p 321 (1982), North-Holland Publ. Co., New York, 1982.
- 3.5.10 SHOESMITH D.W., BAILEY M.G. and SUNDER, S.**
“Corrosion of UO₂ in Solutions Containing Dissolved Oxygen, Hydrogen Peroxide, or the Products of the Alpha-Radiolysis of Water”, in: AECL Technical Record, TR-350 (1985).
- 3.5.11 HEIMANN R.B.**
“Interactive Testing of Waste Forms” in: AECL Technical Record, TR-350 (1985).
- 3.5.12 Systemstudie Andere Entsorgungstechniken,**
Technischer Anhang 9, Auslaugungsversuche an unbestrahlten und bestrahlten Kernbrennstoffen in Salzlaugen, KWU AG, Oktober 1984.
- 3.6.1 DRESSELAERS J., CASTEELS F. and TASH.**
“Corrosion of construction materials in clay environments.”, In “Scientific basis for nuclear waste management-IV”, ed.: S. Topp, North-Holland Publ. Co., New York (1982), p. 311.
- 3.6.2 MARSH G.P., PINARD-LEGRY G., SMAILOS E., CASTEELS F., VuQUANG K., CRIPPS J. and HAJTINK B.**
“HLW container corrosion and design.”, In “Radioactive waste management and disposal”, Proceedings of the second European Community Conference, Luxembourg, April 22-26, 1985, ed.: R. Simon, Cambridge University Press, Cambridge (1985), p. 314.
- 3.6.3 CASTEELS F., DRESSELAERS J., KELCHTERMANS J., DeBATIST R. and TIMMERMANS W.**
“In situ testing and corrosion monitoring in a geological clay formation.”, In “Design and instrumentation if in situ experiments in underground laboratories for radioactive waste disposal.”, Proceedings of a joint CEC-NEA workshop, Brussels, 1984.05.15-17, eds.: B. Côme, P. Johnston and A. Muller, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands (1985), p. 277.
- 3.6.4 HELIE M. and PLANTE G.**
“HLW container corrosion in geological disposal conditions.”, In “Scientific basis for nuclear waste management-IX”, ed.: L.O. Werme, Materials Research Society, Pittsburgh (1986), in print.
- 3.6.5 VuQUANG K. et al.**
“Étude de films superficiels et du comportement électrochimique de certains alliages à base de Ti.”, Commission des Communautés Européennes, Science et Techniques Nucléaires, EUR 9136 (1984).

- 3.6.6 IKEDA B.M. and McKAY P.**
 "The corrosion behavior of titanium grades 2 and 12", In: AECL Technical Record TR-350, p. 135 (1985).
- 3.6.7 KING F., LITKE C.D., LAM K.W. and KING P.J.**
 "Corrosion of copper", In: AECL Technical Record TR-350, p. 158 (1985).
- 3.6.8 POSTLETHWAITE J. and SCOULAR R.J.**
 "Corrosion of nickelbased alloys", In: AECL Technical Record TR-350, p. 185 (1985).
- 3.6.9 ONOFREI M., RAINE D. and BROWN L.**
 "Ceramic materials for advanced containment", In: AECL Technical Record TR-350, p. 194 (1985).
- 3.6.10 NAGRA Project Gewähr 1985**
 "Endlager fuer Hochaktive Abfälle: Das System der Sicherheitsbarrieren", Projekt-Bericht NGB 85-04.
- 3.6.11 SIMPSON J.P.**
 "Experiments on container materials for Swiss high-level waste disposal projects, Part I", Nagra Technischer Bericht 83-05 (1983).
- 3.6.12 SIMPSON J.P.**
 "Experiments on container materials for Swiss high-level waste disposal projects, Part II", Nagra Technischer Bericht 84-01 (1984).
- 3.6.13 SIMPSON J.P., SCHENK R. and KNECHT B.**
 "Corrosion rate of unalloyed steels and cast irons in reducing granitic groundwaters and chloride solutions", In: "Scientific basis for nuclear waste management-IX", ed.: L.O. Werme Materials Research Society, Pittsburgh (1986), in print.
- 3.6.14 FETT T., KELLER K. and MUNZ D.**
 "Determination of crack growth parameters of alumina in 4-point tests", Nagra Technischer Bericht 85-51 (1985).
- 3.6.15 MARSH G.P., BLAND I.W., DESPORT J.A., NAISH C., WESTCOTT C. and TAYLOR K.J.**
 "Corrosion assessment of metal overpacks for radioactive waste disposal", European Appl. Res. Rept.-Nucl. Sci. Technol. 5 (1983) 223.
- 3.6.16 MARSH G.P., TAYLOR K.J., BLAND I.D., WESTCOTT C., TASKER P.W. and SHARLAND S.M.**
 "Evaluation of the localized corrosion of carbon steel overpacks for nuclear waste disposal in granite environments", In: "Scientific basis for nuclear waste management-IX", ed.: L.O. Werme, Materials Research Society, Pittsburgh (1986), in print.
- 3.6.17 MARSH G.P., TAYLOR K.J. and HARKER A.H.**
 "Corrosion of carbon steel HLW containers after geological disposal", 166th Meeting of Electrochem. Soc., Extended Abstracts, 84-2 (1984) 403.
- 3.6.18 SHARLAND S.M.**
 "A mathematical model of localised corrosion of steel radioactive waste containers", AERE Harwell Report TP.1146 (1985).
- 3.6.19 OVERSBY V.M. and McCRIGHT R.D.**
 "Laboratory Experiments designed to provide limits on the radionuclide source term for the NNWSI project", Lawrence Livermore Natl. Lab., Report No. UCRL-91257, (1984).
- 3.6.20 JUHAS M.C., McCRIGHT R.D. and GARRISON R.E.**
 "Behavior of stressed and unstressed 304L specimens in tuff repository conditions", Lawrence Livermore Natl. Lab. Report No. UCRL-91804, (1984).
- 3.6.21 GLASS R.S., OVERTURF II G.E., Van KONYNENBURG R.A. and McCRIGHT R.D.**
 "Gamma radiation effects on corrosion: In Electrochemical mechanisms for the aqueous corrosion processes of austenitic stainless steels", Lawrence Livermore Natl. Lab., Report No. UCRL-92311, (1985).
- 3.6.22 McCRIGHT R.D.**
 "FY 1985 Status report on Feasibility assessment of copper-base package container materials in a tuff repository", Lawrence Livermore Natl. Lab. Report No. UCID-20509, (1985).
- 3.6.23 ANANTATMULA R.P.**
 "Effects of Grande Ronde basalt groundwater composition and temperature on the corrosion of low-carbon steel in the presence of basalt-bentonite packing", In: "Scientific basis for nuclear waste management-VIII", eds.: C.M. Jantzen, J.A. Stone and R.C. Ewing, Materials Research Society, Pittsburgh (1985), p. 273.

3.6.24 NELSON J.L., WESTERMAN R.E. and GERBER F.S., *ibid*, p. 121.

3.7.1 **Project Gewähr 1985.**

Project Report NGB 85-09, June 1985, p. 14-12.

3.8.1 RATIGAN J.L., LOKEN M.C., LINDE K.M., WAGNER R.A.

“Design Analysis for a Repository in Crystalline Rock”, Office of Crystalline Repository Development, Battelle Memorial Institute, BMI/OCRD-20, 1985.

3.8.2 **Project Gewähr 1985**

Project Report NGB 85-03, Januari 1985.