



FoU-PROGRAM 89

Kärnkraftavfallets behandling och slutförvaring.

**Program för forskning, utveckling
och övriga åtgärder.**

September 1989

I Allmän del

II Program 1990-1995

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING AB

BOX 5864 S-102 48 STOCKHOLM

TEL 08-665 28 00 TELEX 13108-SKB TELEFAX 08-661 57 19

Kärnkraftavfallets behandling och slutförvaring.

**Program för forskning, utveckling
och övriga åtgärder.**

September 1989

INNEHÅLLSFÖRTECKNING DEL I - II

Del I ALLMÄN DEL

FÖRORD

INLEDNING

- 1 FÖRUTSÄTTNINGAR
- 2 AVFALL FRÅN SVENSKA KÄRNKRAFTPROGRAMMET
- 3 ÅTGÄRDER FÖR ATT TA HAND OM RADIOAKTIVT AVFALL FRÅN KÄRNKRAFTVERKEN
- 4 SLUTFÖRVARING AV ANVÄNT KÄRNBRÄNSLE. ÖVERSIKT AV MÅL, PLAN FÖR ÅTGÄRDER OCH KUNSKAPSLÄGET
- 5 SLUTFÖRVARING AV ANVÄNT KÄRNBRÄNSLE. SAMMANFATTNING AV PLANERAD FORSKNING OCH UTVECKLING 1990-1995
- 6 RIVNING AV KÄRNKRAFTVERK

Referenser

Bilaga

Del II FORSKNINGSPROGRAM 1990-1995

- 1 ALLMÄNT
- 2 LOKALISERING AV SLUTFÖRVAR FÖR ANVÄNT BRÄNSLE OCH ÖVRIGT LÅNGLIVAT AVFALL
- 3 SÄKERHETSANALYSER
- 4 UTFORMNING AV FÖRVAR
- 5 TEKNISKA BARRIÄRER
- 6 BERGETS EGENSKAPER
- 7 KEMI
- 8 METOD- OCH INSTRUMENTUTVECKLING
- 9 UNDERJORDISKT BERGLABORATORIUM
- 10 STRIPA-PROJEKTET
- 11 NATURLIGA ANALOGIER
- 12 BIOSFÄRSSTUDIER
- 13 INTERNATIONELLT SAMARBETE

Referenser

UNDERLAGSRAPPORTER

- I Granskningen av FoU-program 86. Sammanställning och SKBs kommentarer
- II Underjordiskt berglaboratorium

INNEHÅLLSFÖRTECKNING DEL II

	Sida
1 ALLMÄNT	9
2 LOKALISERING AV SLUTFÖRVAR FÖR ANVÄNT BRÄNSLE OCH ÖVRIGT LÅNGLIVAT AVFALL	11
2.1 Bakgrund	11
2.2 Faktorer som påverkar lokaliseringen	11
2.3 Plan för lokalisering	12
2.3.1 Kandidatplatser	12
2.3.2 Undersökningar	13
2.4 Plan för myndighetsredovisning	14
2.4.1 Kandidater för detaljerade undersökningar	14
2.4.2 Plan för förundersökningar	14
2.4.3 Platser för detaljerade geounder-sökningar	14
2.4.4 Plan för detaljundersökningar	14
2.4.5 Genomförande av detaljundersökningar	14
2.4.6 Lokaliseringsansökan	14
2.4.7 Tillstånd för byggstart	15
2.5 Det geologiska underlaget	15
2.5.1 Allmänt	15
2.5.2 Förundersökningar	15
2.5.3 Detaljundersökningar	16
3 SÄKERHETSANALYSER	17
3.1 Allmänt	17
3.2 Mål	17
3.2.1 Tidplanen i stort och säkerhets-analysernas roll	17
3.2.2 Metodutveckling	18
3.2.3 Mål för perioden 1990-1995	19
3.3 Utvecklingsläge	19
3.3.1 Scenarier	19
3.3.2 Modeller och kopplingar	20
3.3.3 Platsspecifika databaser	22
3.3.4 Kriterier och myndighetskrav	22
3.3.5 Tilltro	22
3.4 Program	23
3.4.1 1990-1992	23
3.4.2 1993-1995	24
4 UTFORMNING AV FÖRVAR	25
4.1 Allmänt	25
4.2 Mål	26
4.3 Alternativa utformningar	26
4.3.1 WP-Cave utformning	26
4.3.2 Djupa borrhål, utformning	27
4.3.3 Byggmetoder	28
4.4 Alternativjämförelser	28
4.4.1 WP-Cave	28
4.4.2 Djuphål	29
4.4.3 Övrigt	29
4.5 Forskningsprogram 1990-1995	29

	Sida	
5	TEKNISKA BARRIÄRER	31
5.1	Avfallsformer	31
5.1.1	Mål för FoU-verksamheten	31
5.1.2	Nuvarande kunskapsläge	31
5.1.3	Viktigare remissynpunkter från FoU-program 86	34
5.1.4	Forskningsprogram 1990-1995	34
5.2	Kapsel	36
5.2.1	Mål för FoU-verksamheten	36
5.2.2	Nuvarande kunskapsläge	36
5.2.3	Viktigare remissynpunkter från FoU-program 86	37
5.2.4	Forskningsprogram 1990-1995	37
5.3	Buffert och återfyllning	38
5.3.1	Bakgrund	38
5.3.2	Mål för FoU-verksamheter	38
5.3.3	Nuvarande kunskapsläge	38
5.3.3.1	Bentonitens långtidsstabilitet	38
5.3.3.2	Kemisk konditionering, inblandning av bergkross, m m	39
5.3.3.3	Reologi, vattenupptagning, erosionsbeständighet	39
5.3.3.4	Effekter av gas	40
5.3.3.5	Tättningsåtgärder i borrhål och schakt	40
5.3.3.6	Modellutveckling för barriärfunktion	41
5.3.3.7	QA-program	41
5.3.3.8	Sammanfattning av forskningsresultat	41
5.3.4	Forskningsprogram 1990-1995	43
6	BERGETS EGENSKAPER	45
6.1	Allmänt	45
6.1.1	Bergets roll i slutförvaret	45
6.1.2	Undersökning av berg	45
6.2	Bergets grundvattenrörelser	46
6.2.1	Mål för FoU-verksamheten 1990-1995	46
6.2.2	Nuvarande kunskapsläge	46
6.2.2.1	Observationsmetoder för grundvatten i berg	47
6.2.2.2	Begreppsmodeller	51
6.2.2.3	Validering av modeller för grundvattnets rörelser	55
6.2.2.4	Några särskilda forskningsområden	55
6.2.3	Forskningsprogram 1990-1995	56
6.3	Bergets stabilitet	58
6.3.1	Mål för FoU-verksamheten 1990-1995	58
6.3.2	Nuvarande kunskapsläge	58
6.3.2.1	Tektoniska processer	59
6.3.2.2	Klimatiska processer	59
6.3.2.3	Förvarets inverkan på mekanisk beständighet	60
6.3.2.4	Postglaciala rörelser	60
6.3.2.5	Modellering av bergmassan	62
6.3.2.6	Erfarenheter av jordskalv	63
6.3.2.7	Studier i sydöstra Sverige	63
6.3.3	Forskningsprogram 1990-1995	64
6.3.3.1	Kunskapsöversikt av istider och landhöjning	64
6.3.3.2	Fördjupad tektonisk analys	64
6.3.3.3	Avslutning av Lansjärvsprojektet	65
6.3.3.4	Drift och analys av seismiska data	65
6.3.3.5	Internationella projekt	65

	Sida	
7	KEMI	67
7.1	Grundvattenkemi och geokemi	67
7.1.1	Mål för FoU-verksamheten	67
7.1.2	Nuvarande kunskapsläge	67
7.1.3	Forskningsprogram 1990-1995	69
7.2	Radionuklidkemi	70
7.2.1	Mål för FoU-verksamheten	70
7.2.2	Nuvarande kunskapsläge	71
7.2.3	Forskningsprogram 1990-1995	73
7.3	Kemisk transport och validering av transportmodeller	74
7.3.1	Mål för FoU-verksamheten	74
7.3.2	Nuvarande kunskapsläge	74
7.3.3	Forskningsprogram 1990-1995	76
8	METOD- OCH INSTRUMENT- UTVECKLING	79
8.1	Mål för FoU-verksamheten	79
8.2	Nuvarande kunskapsläge	79
8.2.1	Mätmetoder och instrument för ytundersökningar	79
8.2.2	Mätmetoder och instrument för undersökningar i borrhål	80
8.2.2.1	Borrning	80
8.2.2.2	Kartering av borrhål och borrhål	80
8.2.2.3	Geofysiska mätningar i borrhål	81
8.2.2.4	Geohydrologiska mätningar i borrhål	82
8.2.2.5	Vattenkemiska mätningar i borrhål	83
8.2.2.6	Bergspänningsmätningar	84
8.2.2.7	Positionsbestämningar i borrhål	85
8.2.3	Mätmetoder och instrument för undersökningar från tunnlar och schakt	85
8.3	Forskningsprogram 1990-1995	86
8.3.1	Geologiska mätmetoder och instrument	86
8.3.2	Geofysiska mätmetoder och instrument	87
8.3.3	Geohydrologiska mätmetoder och instrument	87
8.3.4	Kemiska mätmetoder och instrument	88
8.3.5	Bergmekaniska mätmetoder och instrument	88
9	UNDERJORDISKT BERG- LABORATORIUM	89
9.1	Bakgrund och motiv för byggande av underjordiskt berglaboratorium	89
9.2	Lokalisering och utformning av berglaboratoriet	90
9.3	Målsättning och tidplan	91
9.4	Utförda undersökningar i förundersökningsskedet	92
9.5	Program för byggnadsskedet	93
9.5.1	Geologiska undersökningar	94
9.5.2	Geohydrologiska undersökningar	94
9.5.3	Grundvattenkemiska undersökningar	95
9.6	Preliminärt program för driftskedet	95
9.7	Övrigt	96
10	STRIPA-projektet	97
10.1	Mål samt hittills erhållna resultat	97
10.1.1	Kortfattade resultat från Fas 1	97
10.1.2	Kortfattade resultat från Fas 2	97
10.1.3	Mål för Fas 3	98

	Sida	
10.2	Nuvarande projektläge samt forskningsprogram 1990-1992	98
10.2.1	”Site Characterization and Validation”	99
10.2.2	”Improvement of Site Assessment Concepts and Methods”	100
10.2.3	”Sealing of Fractured Rock”	102
11	NATURLIGA ANALOGIER	103
11.1	Allmänt	103
11.2	Poços de Caldas	103
11.3	Cigar Lake	105
12	BIOSFÄRSSTUDIER	107
12.1	Biosfärsstudiernas betydelse för slutförvaring av kärnavfall	107
12.2	Mål	107
12.3	Nuvarande kunskapsläge	107
12.3.1	Biosfärens evolution	107
12.3.2	Transportvägar mellan berg och människa	107
12.3.3	Övrig forskning inom biosfärs-området	108
12.4	Forskningsprogram 1990-1995	108
12.4.1	Biosfärens förändringar	108
12.4.2	Transportvägar i biosfären	108
12.4.3	Modeller och data	108
12.4.4	Platsspecifika studier	108
12.4.5	Acceptanskriterier	109
13	INTERNATIONELLT SAMARBETE	111
13.1	Utländsk FoU av vikt för SKBs program	111
13.2	SKBs samarbetsavtal med utländska organisationer	113
13.3	JSS-projektet — resultat	114
13.4	Samarbete med AECL rörande Underground Research Laboratory	114
13.5	Bränslelakning — workshops	114
13.6	HYDROCOIN	114
13.7	INTRAVAL	115
13.8	Samarbete med TVO, Finland	115
13.9	Samarbete med CEA, Frankrike	115
13.9.1	Lerfrågor	115
13.9.2	Kemifrågor	115
13.10	Samarbete med EURATOM, EG	115
13.10.1	COCO	115
13.10.2	CHEMVAL	115
13.11	Samarbete inom OECD Nuclear Energy Agency	116
13.11.1	RWMC	116
13.11.2	TDB	116
13.12	Samarbete inom IAEA	116
Referenser		117

1 ALLMÄNT

SKBs FoU-program 89 utgör 1989 års plan för forskning och utveckling i överensstämmelse med kärntekniklagens 12 §. Planen redovisar de FoU-åtgärder som bedöms erforderliga för att på ett säkert sätt hantera och slutförvara det svenska kärnavfallet. Denna del II av programmet presenterar de närmaste sex årens forsknings- och utvecklingsarbete. I kapitel 2 redovisas de aktiviteter som tar sikte på lokalisering av ett slutförvar för långlivat avfall. Detta kapitel ger också en översikt av det totala programmet eftersom många aktiviteter är tidsmässigt knutna till lokaliseringsplanen. Kapitel 3 behandlar säkerhetsanalyser. Därefter redovisas insatser som rör utformning av förvar och de tekniska barriärerna. Studier avseende bergets egenskaper, kemiska förhållanden samt den metod- och instrumentutveckling som behövs för dessa studier behandlas i kapitel 6, 7 och 8.

Arbeten inom de större projekten Stripa, underjordiskt berglaboratorium och naturliga analogier beskrivs i separata kapitel. Sedan följer kapitel avseende biosfärsstudier och internationellt samarbete. Ett utförligt program för det underjordiska berglaboratoriet presenteras i en separat underlagsrapport.

De övergripande planerna för omhändertagande av det radioaktiva avfallet från de svenska kärnkraftverken redovisas i del I av programmet.

Vad gäller det använda bränslet är planerna i stort de samma som redovisades i FoU-program 86 innebärande att tidpunkten för byggstart för slutförvaret är 2010. Däremot har tidsschemat för platsundersökningar och lokaliseringsansökan senarelagts ett par år för att bli bättre synkroniserat med utbyggnaden av det underjordiska berglaboratoriet. Start av detaljundersökningar planeras nu till 1995/96 och lokaliseringsansökan till 2003.

Inom varje ämnesområde redovisas nuvarande kunskapsläge med tonvikt på resultat som framkommit på senare år efter KBS-3-rapporten. Vidare anges vilka specifika mål som forskningen inom området har och hur dessa mål relaterar till programmets etappmål. Några av de viktigaste remissynpunkterna på FoU-program 86 redovisas liksom hur dessa beaktats. Slutligen beskrivs planerat forskningsarbete för perioden 1990-1995. För en utförlig genomgång av remisskommentarer till FoU-program 86 hänvisas till en se-

parat underlagsrapport som även ger vissa kommentarer från SKB.

Som stöd för lokaliseringen av slutförvaret och för den fortsatta prioriteringen av forskningsarbetet kommer SKB att till 1991 genomföra en ny säkerhetsanalys kallad SKB 91. Uppläggningsplanen av denna presenteras i kapitel 3.

Studierna av olika alternativa förvarssystem kommer att successivt fokuseras. I en underlagsrapport till FoU-program 86 beskrevs olika tänkbara alternativ. De mest prioriterade av dessa studeras fortlöpande inom ramen för det pågående programmet. För vissa grundutföranden genomförs speciella studier som redovisas separat. Ett exempel är den studie av det sk WP-Caveutförandet som redovisas kortfattat i kapitel 4. Resultaten av sådana studier utgör grunden för den fortsatta prioriteringen av aktuella alternativ. Viktiga bedömningsgrunder är därvid bl a:

- radiologisk säkerhet,
- genomförbarhet mht befintlig eller nära tillgänglig teknik,
- utvecklingspotential,
- kostnader för genomförande,
- osäkerheter i data och modeller samt tilltro till analysens kvalitet.

Prioriteringarna av forskningsarbetet kommer att ske internt inom SKB efter samråd med referensgrupper, experter och andra berörda. De redovisas i rapporter och i anslutning till FoU-programmen var tredje år.

Genomförande av FoU-program 89 beskrivs i del I kapitel 5. För att FoU-verksamheten skall bli effektiv måste den fortlöpande planeringen successivt anpassas till de resultat som uppnås. SKB avser att genomföra erforderlig anpassning inom ramarna för FoU-programmets intentioner.

Planerade insatser avseende rivning av kärnkraftverk framgår av del I kapitel 6. Under perioden 1990-1995 blir insatserna på detta område relativt begränsade.

Planerade informationsinsatser till allmänheten m fl i samband med forskningsprogrammet och lokaliseringsprocessen redovisas inte i denna rapport.

2 LOKALISERING AV SLUTFÖRVAR FÖR ANVÄNT BRÄNSLE OCH ÖVRIGT LÅNGLIVAT AVFALL

2.1 BAKGRUND

Lokaliseringen av slutförvaret för använt kärnbränsle och övrigt långlivat avfall är en av de viktiga frågorna som skall lösas under 1990-talet för det svenska avfallsprogrammet. I FoU-program 86 /2-1/ behandlades denna fråga översiktligt. Ett skäl för detta var att SKN hade tillsatt en "platsvalsgrupp", med uppgift att utarbeta förslag till hur lokaliseringsfrågan borde behandlas. En rapport från denna grupp ingick som bilaga till SKNs granskningsrapport /2-2/ över FoU-program 86 och utgjorde grunden för SKNs synpunkter på SKBs program i denna fråga.

Synpunkterna från SKN innebar bland annat ett successivt urval av möjliga platser genom en geologiskt baserad sållningsprocedur i tre skeden — provskedet, urvalsskedet och tillståndsskedet. Under provskedet skulle ett relativt stort antal områden som bedömts särskilt lämpliga för lokalisering av ett slutförvar sållas fram. Berörda kommuner och länsstyrelser skulle underrättas och anmodas att i sina översiktsplaner reservera de sålunda identifierade specifika områdena. Sådana översiktsplaner skall upprättas för alla kommuner i landet före den 1990-06-30. Under det därpå följande provskedet skulle fältundersökningarna fortsätta och de platser som lämpar sig bäst för ett säkert slutförvar väljas ut. På grundval av inkomna förslag från SKB och efter remissgranskning av dessa bedömer sedan SKN om sk riksintresse enligt naturresurslagen föreligger och meddelar i förekommande fall berörda kommuner och länsstyrelser att så är fallet. Riksintresset innebär att ifrågavarande markområden reserveras för en specifik typ av anläggning, i detta fall ett slutförvar, och ej får nyttjas för annat ändamål.

I regeringens beslut i december 1987 sades att FoU-program 86 svarar mot de krav som kärntekniklagen ställer och bör utgöra grund för det fortsatta arbetet samt att SKNs granskningsynpunkter bör beaktas så långt det är möjligt. SKB har noga övervägt de synpunkter som framförts av SKN och funnit att det inte till alla delar är lämpligt att följa den av SKN föreslagna proceduren. Att från ett brett utgångsmaterial successivt sålla fram ett minskande antal platser ställer krav på att ett relativt stort antal kommuner i sitt planarbete reserverar mark för de områden som sållats fram. Dessa områden skall hållas reserverade i avvaktan på att nödvändiga undersökningar kan genomföras samt beslut om lokaliseringen kan fattas. Proceduren kan alldeles i onödan leda till besvärliga utdragna politiska debatter i många kommuner.

Såsom redovisades redan i FoU-program 89 visar det omfattande underlaget från geologiska fältundersökningar att det finns många platser i Sverige som ur geologisk synpunkt är lämpliga för lokalisering av ett slutförvar. Detta innebär att andra faktorer kan till-

mätas större vikt vid lokaliseringen. Det är tveksamt om man med rimliga insatser kan peka ut den i alla avseenden bästa platsen. Detta är ej heller nödvändigt, det är fullt tillräckligt att finna en plats som har sådana egenskaper hos berget och förhållanden i övrigt att de mycket högt ställda kraven på säkerhet och strålskydd kan tillgodoses. Enligt SKBs uppfattning finns därvid ej skäl att kräva en mer detaljerad urvalsprocess än att med översiktliga data visa att det inte finns uppenbart lämpligare områden tillgängliga än de slutligen föreslagna. Den viktiga, tekniskt detaljerade prövningen av om en plats duger och man där kan bygga ett slutförvar som fyller de mycket högt ställda kraven på säkerhet sker vid granskningen av lokaliseringansökan. Denna prövning kan genomföras först när man har plats-specifika data och en till platsen anpassad utformning.

2.2 FAKTORER SOM PÅVERKAR LOKALISERINGEN

Lokaliseringen av ett slutförvar måste ske med hänsyn till ett stort antal faktorer. Såsom redan framhållits visar den hittills genomförda forskningen att det finns många platser i Sverige som uppfyller de krav man kan ställa på geologin vid ett slutförvar. Lokaliseringen bör därför beakta även andra faktorer som ej direkt har säkerhetsmässig betydelse. Tabell 2-1 ger en översikt av några av de viktigaste.

Tabell 2-1. Parametrar av betydelse för lokalisering av slutförvar.

I	Geologi Topografi Geohydrologi Geokemi	III	Transporter Infrastruktur Markvärde Bebyggelse Befolkningstäthet	IV	Markägare Opinion
II	Biosfär Recipienter		Jordbruk Fiske Militära intressen Kulturhistoriska intressen Arkeologi Kulturgeografiska intressen Naturskydd Flora Fauna Friluftsliv		

Parametrarna i tabellen har grupperats i fyra grupper. Grupperna I och II har främst betydelse för förvarets långsiktiga säkerhet. Grupp III har framförallt betydelse ur byggnads- och driftteknisk synpunkt och därmed samhörande säkerhetsaspekter, samt ur ekonomisk och social synpunkt medan grupp IV har social och politisk betydelse. Vid lokaliseringen kommer man att i första hand se till att grundläggande krav vad avser parametrarna i grupp I och II är tillgodosedda. Därefter söker man en optimal lösning av förhållandena enligt grupp III och IV.

Den valda platsen måste erbjuda sådana förhållanden vad avser geologi m m att man kan anlägga ett slutförvar som fyller de högt ställda säkerhetsmässiga kraven. De grundläggande kraven på platsen är enligt vad tidigare utförda studier visat framförallt:

- låg grundvattenomsättning,
- gynnsam grundvattenkemi.

Vid lokalisering av kandidatplatser eftersträvas platser som har en relativt flack topografi. Detta ger en låg drivkraft för grundvattenomsättning (låg gradient) vilket är en fördel. Vidare undviks regionala rörelsezoner i berggrunden. Storleken av området, arean mellan de sk regionala lineamenten, måste vara väl tilltagen för att ge marginaler. En berggrund som underlättar tolkningen av undersökningsresultaten är att föredra. Vid lokaliseringen undviks områden med potentiella brytvärda malmtillgångar.

2.3 PLAN FÖR LOKALISERING

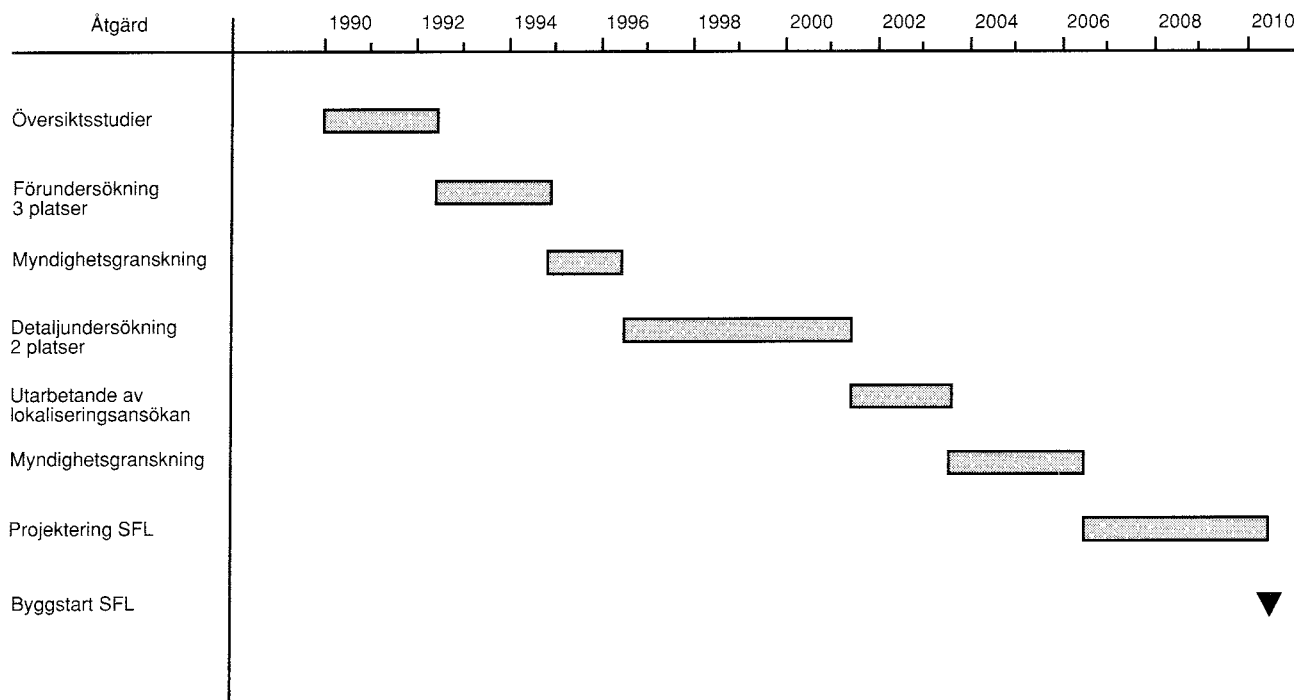
2.3.1 Kandidatplatser

Mot bakgrund av de överväganden som redovisas ovan har SKB utarbetat en plan för lokaliseringen av slutförvaret för använt bränsle. Planen åskådliggörs i sina huvuddrag i Figur 2-1. Den avser att på ett systematiskt sätt knyta ihop insamlingen av platsspecifika data, erforderliga beslut, informationsinsatser inom SKB samt erforderlig myndighetsgranskning och tillståndsgivning.

Fram till 1991 avslutas den inventering av tänkbara områden som mer eller mindre fortlöpande pågått sedan början av 1980-talet. Vidare genomförs vissa geologiska översiktsstudier på basis av nu existerande geologiskt material. Dessa kompletteringar är av generell karaktär och kräver ej ytterligare borrhningar eller borrhålmätningar.

Under 1991 planeras också en ny säkerhetsanalys kallad SKB 91 bli klar. Ett av motiven för denna analys är att ytterligare och mer systematiskt än tidigare utvärdera betydelsen av variationer i de geologiska förhållandena för slutförvarets funktion och säkerhet. I KBS-3-rapporten /2-3/ framhölls att: "Analyserna visar att även områden liknande Finnsjön, med relativt sett högre grundvattenflöden än de nämnda (Gideå och Kamlungekölen och sannolikt även Fjällveden), torde kunna accepteras ur säkerhetssynpunkt." I SKB 91 kommer detta att underbyggas ytterligare på basis

Översiktlig tidplan för lokalisering av slutförvar för använt bränsle (SFL)



Figur 2-1. Översiktlig tidplan för lokalisering av slutförvar för använt bränsle (SFL).

av de erfarenheter som vunnits sedan 1983 då KBS-3 skrevs. En mer detaljerad plan för SKB 91 finns i kapitel 3.

På underlag av de erfarenheter som erhållits från undersökningar av typområden, från Stripa och från arbetena vid Simpevarp för det underjordiska berglaboratoriet, kommer ett program för förundersökningar av kandidater till lokaliseringsplats att utarbetas. Eftersom kunskapen om kandidatplatsernas geologi kan vara mycket olika kommer programmet att redovisa vilka undersökningar som avses bli genomförda på de olika platserna och hur de skall samordnas. Programmet tas fram i början av 1991 för att få maximal nytta av erfarenheterna från berglaboratoriet.

Under 1992 avser SKB att offentliggöra tre platser som SKB anser vara lämpliga kandidater för lokalisering av slutförvaret. Kandidatplatserna väljs med hänsyn till de faktorer som anges i ovanstående avsnitt 2.2. Lokalisering bör dessutom ske så att samhällsservice, kommunikationer och kompetent arbetskraft kan erhållas. Grundläggande för att en plats skall kunna utses till kandidatplats är att den erbjuder en god potential till att åstadkomma ett förvar med hög säkerhet.

Underlaget kommer vid denna tidpunkt att vara av översiktlig karaktär och måste kompletteras genom förundersökningar och sedermera även detaljundersökningar. Syftet är emellertid att kunna koncentrera fortsatta geostudier, tillståndsfrågor och informationsinsatser till ett fåtal lovande områden. Som underlag för valet av kandidatplatser presenteras samtidigt resultaten från de ovan angivna studierna samt en sammanställning av befintliga data för de tre platserna. I anslutning till offentliggörandet intensifieras SKBs information om de frågor som har speciellt intresse för lokalisering av ett slutförvar.

En viktig del av arbetet är att planera och genomföra saklig och öppen information till markägare, närboende, kommun, myndigheter m fl.

2.3.2 Undersökningar

Efter att kandidatplatserna offentliggjorts påbörjas en iterativ process av platsspecifika undersökningar, resultatsammanställningar och utvärderingar, samt planering av eventuellt vidare studier. Härigenom fås ett successivt utökad underlag för bedömning av kandidatplatsernas lämplighet, för möjligheter till inplacering av ett förvar, för möjliga tunnelsträckningar och deponeringspositioner, för inplacering av förseglingspluggar etc. På den slutligt valda förlägningsplatsen kommer processen att sträcka sig ända fram till att slutförvaret förseglats.

Den utökade detaljinformationen kräver dock successivt större ingrepp på platserna i form av schakt/tunnlar till aktuellt förvarsdjup och tunnlar/borrhål i den tillgängliga deponeringsvolymen. Det är därför väsentligt att undersökningarna planeras och genomförs med hänsyn till dess effekter på ett förvar.

Efter tillstånd från markägaren kommer under åren 1992-94 förundersökningar att genomföras på de tre platserna enligt det ovan angivna programmet. SKB 91 kompletteras med hänsyn till platsspecifik informa-

tion för att ge underlag för en preliminär bedömning av den långsiktiga säkerheten för ett slutförvar lokaliserat till endera av de tre platserna. Samtidigt kompletteras och fördjupas genomgången av de parametrar som har betydelse för lokaliseringen.

Under 1994 upprättas ett generellt program för detaljundersökningar av kandidatplatserna. Programmet baseras på de erfarenheter som erhållits vid byggandet av berglaboratoriet och det i samband därmed genomförda experimentprogrammet. Vidare tas en preliminär miljöeffektbeskrivning fram för var och en av de tre platserna. Denna beskrivning syftar i första hand till att redovisa effekterna av att genomföra detaljundersökningar och kan endast mycket översiktligt beskriva effekterna av ett slutförvar på respektive plats.

Undersökningsresultat, program för detaljundersökningar, preliminär säkerhetsbedömning samt miljöeffektbeskrivningar redovisas till berörda myndigheter i slutet av 1994. Berörda myndigheter är i första hand SKN, kommun och länsstyrelse. SKI, SSI och andra organ kan väntas komma in som remissinstanser till de nämnda myndigheterna. Efter en granskningstid på ca 18 månader bedöms att erforderliga godkännanden och tillstånd för detaljundersökningar kan föreligga i början av 1996. Sådana undersökningar startar då på en plats och på en andra plats under 1997. Detaljundersökningarna genomförs i väl avpassade etapper. Ett platsspecifikt program för detaljundersökningarna och deras etappindelning tas fram 1995/96. Det baseras på erfarenheter från berglaboratoriet och från förundersökningarna av kandidatplatserna.

Som underlag för att starta detaljundersökningar krävs en grov layout över erforderligt område för ett slutförvar. Under 1995 måste man därför välja en principiell utformning av slutförvarssystemet. I samband med detta val redovisas en sammanställning av genomförda studier av olika alternativ samt av då föreliggande kunskaper om komponenterna i barriärsystemet. Detta förutsättes kunna ske i anslutning till FoU-program 95. Under åren 1995-98 görs erforderliga kompletteringar av underlaget för komponenterna i den valda principutformningen samt vidareutvecklas och verifieras de modeller som krävs för en optimering av slutförvaret till den plats som slutligt väljs. Optimeringen genomförs parallellt med en andra etapp av detaljundersökningen. Dessa aktiviteter beräknas klara till 2001 då en lokaliseringsansökan enligt Naturresurslagen (NRL) och enligt Kärntekniklagen (KTL) börjar förberedas. Ansökan som bör vara klar till 2003 innehåller en preliminär säkerhetsrapport med en detaljerad analys av slutförvarets långsiktiga säkerhet. Ansökan antas behöva en prövningstid på tre år, vilket i så fall skulle innebära att en av regeringen godkänd lokaliseringsplats skulle finnas 2006.

Efter det att lokaliseringen godkänts genomförs en projektering och en uppdatering av säkerhetsrapporten speciellt med avseende på säkerheten under drift-(deponerings-, övervaknings-)skedet. Denna rapport bedöms vara klar 2008 och utgör grund för SKIs och andra myndigheters godkännande av byggstart 2010.

Målsättningen för SKB under hela lokaliseringsskedet är att erfarenheterna från FoU verksamheten på ett systematiskt sätt skall tillvaratas och att den erhållna informationens säkerhetsmässiga betydelse successivt skall utvärderas. På grundval av denna utvärdering kommer också kritiska parametrar och förhållanden att identifieras som underlag för FoU-prioritering.

2.4 PLAN FÖR MYNDIGHETS-REDOVISNING

Nedan diskuteras syfte och inriktning av den säkerhetsrelaterade granskning myndigheterna förväntas genomföra i anslutning till lokaliseringsplanen.

2.4.1 Kandidater för detaljerade undersökningar

Myndigheternas roll i detta skede är knuten till den generella granskning av FoU-programmet som SKN genomför. Den förväntas primärt syfta till att fastställa om man accepterar SKBs bedömning — att en koncentration av insatserna, både vad gäller geologiska studier och information, är önskvärd och möjlig att genomföra enligt redovisad planering, utan att potentialen till framgångsrik lokalisering onödigtvis begränsas.

2.4.2 Plan för förundersökningar

Inför förundersökningarna kommer SKB som redan nämnts att upprätta en plan för hur dessa skall genomföras. Planen kommer även att innehålla en diskussion om hur de planerade undersökningarna kan inverka på de egenskaper hos berget som har betydelse för säkerheten hos ett slutförvar. Myndigheterna förväntas granska denna plan.

2.4.3 Platser för detaljerade geoundersökningar

Kring 1994 kommer förundersökningarna att ha gett en ny platsspecifik databas som tillåter en fördjupad värdering av platsernas potential som förvarsplatser.

Baserat på säkerhetsanalysen SKB 91 kommer variationsanalyser att genomföras för att fastställa den säkerhetsmässiga betydelsen av olikheter mellan platserna. Informationen från denna undersökningsfas blir i första hand tillämplig på säkerhetsanalysens fjärrzonsbeskrivning, t ex större zoners lägen, tillgängligt utrymme mellan svaghetszoner och den storskaliga gradienten över möjliga deponeringsområden. Viss statistisk information om fördelning av hydraulisk konduktivitet i undersökningsområdet kommer också att finnas tillgänglig liksom data om grundvattnets kemi.

Såvida inga väsentliga ogynnsamma faktorer framkommer utpekas två av de studerade områdena som platser för detaljerade geologiska undersökningar. Skulle flera platser visa sig vara mindre lämpliga för fortsatta undersökningar kan det bli nödvändigt att

utse fler kandidater, med en förskjutning i tidplanerna som följd. SKB bedömer risken för detta som liten.

Förutom att göra en preliminär säkerhetsbedömning och upprätta preliminära layouter kommer miljöeffekter under detaljundersökningar och utbyggnad av slutförvar att utvärderas. Säkerhetsbedömning, miljöeffektutredningar och planering av fortsatta detaljundersökningar förutsätter att alternativa förvarsutformningar prövas på kandidatplatserna. Vidare kommer andra samhällseffekter på kommunerna där kandidatplatserna finns att utvärderas.

Myndigheterna förväntas granska säkerhetsrelevansen av variationsanalyserna och övertyga sig om att SKB gjort en rimlig tolkning av den platsspecifika informationen. De detaljerade geoundersökningarna kommer att kräva omfattande ekonomiska och personella resurser och dessutom i ett visst skede bli bygglov från kommunen. Det förutsätts därför att SKN och övriga berörda centrala, regionala och lokala myndigheter godkänner starten av detaljundersökningar.

2.4.4 Plan för detaljundersökningar

De geologiska detaljundersökningarna kommer att baseras på platsspecifika planer för hur undersökningarna skall genomföras. Dessa utvecklas i sin tur på grundval av det generella programmet för detaljundersökningar som tas fram under 1994, på successivt inkommen platsspecifik information och på erfarenheterna från berglaboratoriet. Undersökningarnas effekt på ett framtida förvar är här en viktig fråga, speciellt den framtida betydelsen av placeringen av schaktet eller tunneln ner till förvarsdjup. Andra frågor som kommer att tas upp är strategin för undersökning av bergmassan, vilka parametrar som skall mätas och de mätmetoder som skall utnyttjas. Ett erfarenhetsunderlag bli från berglaboratoriet kommer att föreligga. Myndigheterna förväntas granska detta material.

2.4.5 Genomförande av detaljundersökningar

En uppdelning av studierna i etapper är trolig, med möjlighet att avbryta om det skulle visa sig att en plats är olämplig.

Detaljundersökningarna kommer under 1996-99 att kraftigt öka tillgången till platsspecifika data. På basis av dessa bör det vara möjligt att lägga in en trolig förvarsgeometri med nivåer, tunnelriktningar och deponeringsområden. På basis av den geohydrologiska variabiliteten i potentiella deponeringsområden bör utrymmesbehov och en närområdesspecifik databas kunna fastställas.

SKB förutsätter att en viktig del av myndigheternas granskning kommer att bestå i en kontinuerlig uppföljning av detta arbete.

2.4.6 Lokaliseringsansökan

I lokaliseringsansökan som avses inlämnad 2003, och i första hand omfatta en plats kommer att ingå en preliminär säkerhetsrapport med tonvikt på den långsik-

tiga säkerheten hos slutförvaret. Analysen baseras på resultaten av den detaljerade platsundersökningen och på det till platsen optimerade slutförvarssystemet. Denna ansökan prövas enligt kärntekniklagen vad avser de radiologiska säkerhetsfrågorna. I lokaliseringsansökan kommer också en beskrivning att ges för mätmetoder och bedömningsgrunder för att framställa bergets lokala kvalitet allteftersom drivningen av deponeringstunnlarna fortskrider, samt för hur deponeringshålen inplaceras med hänsyn till detta. Ansökan i sin helhet prövas enligt naturresurslagen, miljöskyddslagen, plan- och bygglagen m fl.

2.4.7 Tillstånd för byggstart

I god tid före planerad byggstart uppdateras säkerhetsrapporten. I första hand avser uppdateringen säkerheten i samband med transport, hantering, inkapsling, deponering mm av avfallet. Rapporten kan även ge en uppdatering av den preliminära analysen av den långsiktiga säkerheten. Även denna rapport bör prövas enligt kärntekniklagen.

Den slutliga redovisningen av förvarets långsiktiga säkerhet kommer med all sannolikhet ej att lämnas förrän vid ansökan om tillstånd för förslutning av förvaret. Detta förhållande innebär inte att kraven på de redovisningar som lämnas i samband med lokaliseringsansökan och vid ev senare tillfällen på något sätt skulle vara lindrigare än för en slutlig redovisning. Ordet preliminär bör m a o ej misstolkas.

2.5 DET GEOLOGISKA UNDERLAGET

2.5.1 Allmänt

SKB har i olika perioder genomfört omfattande inventeringar och rekognosceringar över möjliga platser för ett slutförvar. Nuvarande data från rekognosceringarna är företrädesvis geologiska faktorer av den typ som angivits i avsnitt 2.2. Kandidatplatserna ska ha sådana kvalitet att det bedöms att man kan visa den långsiktiga säkerheten i en lokaliseringsansökan år 2003. För lokaliseringen av kandidatplatser behövs kompletterande uppgifter som fysisk riksplanering, kommunala översiktsplaner m m.

Hittills utförda undersökningar har genomförts på land. Möjligheten att lokalisera ett slutförvar under Östersjön bör dock fortfarande hållas öppen eftersom en sådan lokalisering har klara säkerhetsmässiga fördelar under långa tidsrymder. Hit hör faktorer som t ex definierad gradient för grundvattnets strömning, låg grundvattenomsättning och senareläggning av det sk brunns scenariot. Med hänsyn till de fördelar en kustnära förläggning synes erbjuda, planerar SKB att för kustnära kandidatplatser sammanställa geologiskt underlag från land och ca 10 km ut från kusten.

SKB planerar även att sammanställa ett jämförelse-material för vissa av de typområdesundersökningar

som tidigare redovisats. De variationer i data som finns på dessa typområden ska kunna jämföras med de variationer som analyseras i SKB 91. Härigenom underbyggs ytterligare slutsatsen att det finns många platser i Sverige som ur geologisk synpunkt är lämpliga för lokalisering av ett slutförvar.

Sedan FoU-program 86 presenterades har vissa studier genomförts i avsikt att bredda det geologiska underlaget inför valet av kandidatplatser. Sveriges morfologi, berggrund och tektonik har sammanställts i /2-4/. Rapporten bygger i huvudsak på befintligt material. Den tektoniska bilden har tagits fram med hjälp av geologiska kartor, lineamentskartor baserade på Landsat images och reliefkartor. Sverige har indelats i tektoniska regioner, och orientering, täthet och längd hos lineament presenteras på kartor.

En sammanställning av södra Sveriges berggrund och tektonik samt omgivande havsområden har redovisats /2-5/. Som underlag har förutom konventionellt geologiskt material även använts data från ett flertal prospekteringsarbeten. Flera seismiska profiler från land och ut över närliggande havsområden finns redovisade. Materialet har sammanställts i ett stort antal kartor och profiler.

I FoU-program 86 berördes frågan om lokalisering av slutförvaret i bergarten gabbro i stället för gnejs, granit eller motsvarande typ av bergart. Det konstaterades därvid bl a att "gjorda undersökningar och allmänna erfarenheter av gabbro visar att det torde vara förhållandevis svårt att finna tillräckligt stora homogena formationer bland de i jämförelse med gnejs eller granit sparsamt förekommande gabbromassiven." Vidare att "slutsatsen är att det bedöms rationellt att koncentrera de fortsatta geologiska studierna på gnejs och granit. Dessa bergarter är tillräckligt bra och ur allmän synpunkt de mest sannolika för lokalisering av ett slutförvar." Dessa överväganden väckte viss kritik från några remissorgan. Bl a hävdade man att SKB ej beaktat allt tillgängligt material beträffande gabbromassiv vid sin bedömning. Med anledning av den framförda kritiken uppdrog SKB åt SGU att komplettera redan gjord inventering av gabbromassiv. Denna kompletterande utredning föranleder ingen ändring av de slutsatser som drogs i FoU-program 86.

2.5.2 Förundersökningar

SKB planerar som framgår av det föregående att genomföra undersökningarna för kandidatplatserna i ett förundersökningsskede och ett detaljundersökningsskede. SKB driver f n flera projekt av utomordentligt hög ambitionsnivå för att utveckla och pröva teknik för sådana undersökningar. Hit hör t ex det underjordiska berglaboratoriet och Stripa-projektet, se vidare kapitel 9 och 10.

Förundersökningar ska ge underlag till att anvisa vilka volymer som är aktuella för fortsatta detaljundersökningar, att göra en preliminär bedömning av om platsen uppfyller grundläggande krav mht den långsiktiga säkerheten och ge underlag till alternativa, preliminära förvarsutformningar.

Förundersökningarna ska också ge en allmän karakterisering av kandidatplatsen. Baserat på geologiska

och geofysiska ytundersökningar dokumenteras huvudbergart och större tektoniska zoner på kandidatplatsen och i dess omgivning. Borrningar genomförs med några hål till stort djup varvid bergarter och sprickzoner dokumenteras. Bergspänningar mäts för att bedöma den mekaniska stabiliteten för olika djup. Bergets konduktivitet och grundvattenomsättning mäts. Representativ vattenkemi mäts. De frågor som rör zoners och flödesvägars geometri och inbördes samband studeras först under detaljundersökningskedet.

Förundersökningarna ska även anvisa vilka volymer som är av intresse för fortsatta detaljundersökningar. Volymer som bedöms användbara för förvarsplacering ska anges. Vidare ska de volymer definieras som senare behöver karakteriseras mellan förvar och utströmningsområden.

Resultaten från förundersökningarna utnyttjas till att planera fortsättningen av de detaljerade undersökningarna.

Programmet för förundersökningar ska redovisa hur och vilka insatser som skall genomföras vid de olika platserna. Ett generellt program redovisas under 1991. För varje kandidatplats kommer sedan ett plats-specifikt program att utarbetas och genomföras. En

samordning mht resurser av olika slag kommer att erfordras.

2.5.3 Detaljundersökningar

Detaljundersökningarna ska

- bekräfta att en lämplig förvarsvolym finns tillgänglig,
- ge underlag för platsanpassning av tillfart till förvaret,
- ge preliminärt underlag för hur utbyggnad av förvaret ska ske,
- ge data så att förvarssystemet kan optimeras med hänsyn till tekniska barriärer och geometrisk utformning,
- karakterisera området i erforderlig omfattning så att ett mycket gott underlag kan presenteras till lokaliseringsansökan.

Det förutses att detaljundersökningar genomförs på två av kandidatplatserna med lämplig tidsförskjutning och att undersökningarna indelas i väl avvägda etapper.

Ett generellt program för detaljundersökningar presenteras under 1994.

3 SÄKERHETSANALYSER

3.1 ALLMÄNT

Den kärntekniska verksamheten måste genomföras på ett acceptabelt sätt med hänsyn till säkerhet och strålskydd. Bedömningen av verksamhetens säkerhet görs med hjälp av funktionsanalyser och säkerhetsanalyser. Funktionsanalyserna utgör studier av delsystem och deras växelverkan, eller av de speciella förhållanden under vilka funktionen skall garanteras. Dessa studier ligger sedan till grund för de studier av den totala säkerheten som utgör säkerhetsanalysen. En säkerhetsanalys skall förutom säkerhetsnivå också redovisa den osäkerhet som bedömningarna är behäftade med.

Under olika faser av utveckling och licensiering av ett slutförvar kommer syftet med funktionsanalyserna att ändras. I ett inledande skede utvärderas förvarets olika delfunktioner. Osäkerheten i kunskapsunderlaget för väsentliga funktioner ger prioriteter för forskning och utveckling.

I ett senare skede söker man uppnå en balans mellan säkerhetsbarriärerna, dvs systemet skall optimeras med avseende på funktion och kostnad på en acceptabel säkerhetsnivå. För tillståndsgivningen skall det slutligen på ett formellt sätt visas att systemet uppfyller samhällets krav på säkerhet.

SKBs FoU-program befinner sig idag i ett skede där de grundläggande genomförbarhetsstudierna har avslutats. Granskning av alternativa förläggningar och förvarsutföranden pågår och en successiv gallring av alternativ med mindre utvecklingspotential genomförs. I detta skede är det väsentligt att studierna av funktion och säkerhet under förvaringsskedet ger en bas för variationsstudier där de olika barriärernas eller utformningarnas säkerhetsbetydelse kan bedömas.

Jämfört med KBS-3 som syftade till en bevisning av genomförbarheten, kommer nästa större integrerade säkerhetsanalys, SKB 91, att i möjligaste mån reducera pålagda säkerhetsmarginaler i beräkningarna och undvika starkt pessimistiska förenklingar. Tanken är fortfarande att utgå ifrån en konstruktion och en dimensionering som väl motsvarar acceptanskraven och som har erforderliga säkerhetsmarginaler. Detta kommer att medföra förbättrade möjligheter att kvantifiera den säkerhetseffekt som en ändring i konstruktion eller dimensionering kan ha.

För att uppfylla ovan givna önskemål måste en säkerhetsanalys baseras på:

- uppgifter om avfallsmängder och radioaktiva ämnen i förvaret,
- en beskrivning av en referenskonstruktion med materialuppgifter, dimensioner och kvalitetskrav,
- en karakterisering av förlägningsplatsen med avseende faktorer av vikt för säkerheten samt deras variationer och osäkerhet.

Funktionsanalyserna omfattar då följande moment:

- en genomgång av de externa förhållanden (scenarier) som kan uppkomma, och en definition av vilka av dessa som förvaret skall klara av,
- en redovisning av de processer av betydelse för förvarets säkerhet som kan förekomma, samt av de modeller och databaser med vars hjälp processerna kvantifieras,
- en beräkning av förvarets funktion med avseende på tid för de konstruktionsstyrande scenarierna.

För att utgöra en säkerhetsanalys måste därutöver följande ingå:

- en definition av samhällets acceptanskrav för avfallet och över aktuella tidsperioder,
- en jämförelse mellan beräknade konsekvenser/sannolikheter och acceptanskriterierna,
- en bedömning av osäkerheten i dataunderlag och modeller med avseende på dess betydelse för acceptansen.

Detaljeringsgrad och fullständighet i de olika momenten kommer att variera med utvecklingsläge och kunskapsunderlag, samt med det specifika syftet med varje analys. I detta kapitel behandlas mål, utvecklingsläge och program för väsentliga delar av funktions- och säkerhetsanalyserna.

Vid granskningen av FoU-program 86 rekommenderade SKN att SKB under 1988 skulle utarbeta en lättillgänglig och klagörande skrift om metoder och arbets sätt inom funktions- och säkerhetsanalys. SKB har underskattat den arbetsinsats som erfordras för att utarbeta en sådan skrift, arbetet har gått långsammare än vad förväntats. Materialet kommer att bearbetas ytterligare innan det distribueras till en större krets. Målsättningen är att först sammanställa ett material som av berörda inom branschen bedöms ge en någorlunda god och täckande beskrivning, samt därefter bearbeta det till olika nivåer av lättillgänglighet.

3.2 MÅL

3.2.1 Tidplanen i stort och säkerhetsanalysernas roll

I FoU-program 86 framgår att den definitiva utformningen av slutförvaret av använt kärnbränsle skall göras först kring år 2000. Forskningsinsatserna skall inriktas på att ta fram erforderligt underlag för detta. Den allmänna tidplanen för att uppnå detta har redovisats i kapitel 2.

Säkerhetsanalyserna utgör en del av underlaget för den nödvändiga beslutssekvensen inom SKB, för myndigheternas bedömning av framstegen i SKBs FoU-arbete och för myndigheternas beslut vid tillståndsfrågor. Samtidigt utgör en integrerad säkerhetsanalys ett viktigt verktyg för att sammanväga betydelsen av fram-

stegen inom de olika verksamhetsområden, och för att utvärdera behovet av ytterligare insatser.

Av tidplanen i kapitel 2 framgår att i början av 1992 kommer tre platser att föreslås som kandidater för ett blivande slutförvar.

I KBS-3-rapporten konstaterades att berggrunden på flera ställen i Sverige har den beskaffenhet som krävs för ett säkert slutförvar. Det konstaterades också att även områden med relativt sett högre grundvattenflöden än de som detaljanalyserades i KBS-3 torde kunna accepteras. Vidare funktionsstudier av olika komponenter och förvarsdelar har på flera områden bättre kunnat kvantifiera osäkerheterna och de erforderliga säkerhetsmarginalerna. Erfarenheterna har förstärkt uppfattningen att ett säkert förvar kan byggas på ett flertal platser i landet.

Som underlag för att kunna bedöma den säkerhetsmässiga betydelsen av förlägningsplatsens geologi kommer en integrerad säkerhetsanalys att genomföras till 1991, SKB 91. Analysen skall, för ett centralfall, baseras på de geologiska förhållandena i Finnsjön, och genomföras på så sätt att betydelsen av ändringar i de geologiska förhållanden kan studeras genom variationsanalyser. Jämfört med KBS-3 kommer SKB 91 att i mindre grad utnyttja säkerhetsmarginaler och pessimistiska förenklingar för att etablera en viss säkerhetsnivå. Strävan kommer att vara att få en ökad realism i analysen och därigenom få ett bättre underlag för rättvisande variationsanalyser.

Under perioden 1992—1994 genomförs undersökningar för att undersöka de tre kandidatplatsernas lämplighet. De syftar till att ta fram två platser lämpliga för detaljerade undersökningar. År 1994 förväntas tillräckligt underlag föreligga för att visa om platserna motsvarat förväntningarna.

Förundersökningarna kommer att ge underlag för platsspecifika variationsstudier med SKB 91. Dessa studier utgör en del av underlaget för att bedöma om kandidatplatserna visat sig lämpade för de fortsatta detaljundersökningarna.

Om myndigheterna accepterar valet kan beslut tas att genomföra vidare detaljundersökningar på två platser från 1995. Dessa kommer då att innefatta schaktsänkning eller tunneldrivning för att ge en detaljerad beskrivning av berget på förvarsdjup. Därvid måste man beakta att platsundersökningarna kan påverka platsens lokala förhållanden. Effekten av schakt eller tunnel i olika lägen på den aktuella platsen måste klarläggas, liksom hur nedfarten passar in om platsen skulle väljas som förlägningsplats. Underlaget kommer även här till stor del från SKB 91 och förundersökningarna.

Samtidigt med ovanstående byggs berglaboratoriet ut med byggstart 1990. Ur säkerhetsanalysens synpunkt utgör detta under sitt byggnadsskede främst ett storskaligt prov på vår förmåga att förutsäga bergkvaliteten på djupet och av kvaliteten på våra undersökningsmetoder. Modeller för grundvattenströmning kommer att prövas i anknötning till laboratoriets utbyggnad, och en avsevärd förstärkning av databaserna för berg på förvarsdjup förväntas.

Verksamheten i övrigt syftar till att validera eller vidareutveckla modeller av betydelse för slutförvaring-

ens säkerhet i en geologisk miljö som bedöms vara karakteristisk för ett kommande slutförvar. Om platsdata eller säkerhetsanalyser under 90-talet föranleder omvärdering av de faktorer eller processer som betraktas som mest säkerhetsrelevanta kan försöken i berglaboratoriet behöva anpassas till detta.

Parallellt med de geoinriktade undersökningarna studeras under första halvan av 90-talet alternativa utformningar av förvarets tekniska barriärer och närområdet. Parametrar av betydelse för lokaliseringen måste klarläggas under 1994. Kring 1996/97 bedöms studierna ha nått sådan mognad att en huvudutformning kvarstår för slutlig anpassningen till den valda förlägningsplatsen.

Referensutformning och modelluppsättning i SKB 91 kommer att väljas så att den även är lämpad för variationsstudier inom närområdet. Sannolikt behöver dock fjärrzonsdelen av analysen modifieras under perioden 1994/95 med hänsyn till hur olika modeller klarade av att prognosera grundvattenströmningen i berglaboratoriet.

Den allmänna forskningen pågår under hela denna period som stöd för lokalisering och systemval. Erfarenheter och information från berglaboratoriet, fältundersökningar och forskningen i övrigt matas successivt in i säkerhetsanalyserna i form av förbättrade modeller eller dataunderlag.

Samtidigt som den platsspecifika optimeringen av en slutförvarsanläggning påbörjas kring 1999, måste analyssekvens och inriktning i säkerhetsanalyserna modifieras så att den svarar mot behoven i en lokaliseringsansökan år 2003.

Efter lokaliseringsansökan förutses ett byggnadstillstånd till 2010, ett drifttillstånd 2020, samt tillstånd för försegling under 2050-talet. Motsvarande anpassningar och uppdateringar av säkerhetsredovisningen förutses inför dessa tillfällen.

3.2.2 Metodutveckling

För att underlätta systematiska säkerhetsbedömningar och variationsanalyser pågår en nationell och internationell metodutveckling.

Utvecklingen gäller metoder för bl a

- genomförande av probabilistiska analyser,
- definition och utvärdering av scenarier,
- validering av beräkningsmodeller,
- analys av osäkerheter, känslighet etc.

Insatserna har en sådan karaktär att det är mycket svårt att ange kvantitativa mål till olika tidpunkter, bästa tillgängliga metodik kommer att användas vid varje analystillfälle. Utvecklingsläget framgår av avsnitt 3.3.

För att förstärka möjligheterna att genomföra säkerhetsanalyser, och en till dessa anpassad metodutveckling, har resurserna inom SKB utökats med två personer. En med huvudinriktning mot nuklidtransport inom närzonen, och en mot nuklidtransport i geosfären.

Syftet med SKBs insatser är att successivt vidareutveckla metoderna med hänsyn till hur säkerhetsbe-

dömningarna kommer att utnyttjas vid olika tidpunkter. Metoderna skall underlätta granskning och skapa förståelse för hur analyserna har genomförts. De skall om möjligt vara internationellt accepterade.

3.2.3 Mål för perioden 1990-1995

Sammanfattningsvis gäller följande mål för arbetet inom området säkerhetsanalys under perioden 1990-1995.

Funktions- och säkerhetsanalyserna skall ge beslut-sunderlag enligt SKBs allmänna tidplan.

- Till 1991 genomförs en fullständig säkerhetsanalys (SKB 91) för en utformning som nära ansluter sig till KBS 3. Analysen utförs så att variationsanalys lätt kan genomföras.
- I anslutning till säkerhetsanalysen genomförs till 1991 också variationsanalyser av hur olika geologiska förhållanden påverkar resultatet av säkerhetsanalysen.
- Till 1994 genomförs plats specifika kompletteringar av SKB 91 för de kandidatplatser som anges i början av 1992.
- Till 1995 genomförs jämförande funktionsanalyser för sådana barriäralternativ som kan ha betydelse för genomförandet av geologiska detaljundersökningar.

Metodutveckling för osäkerhetsstudier, scenariedefinition, validering, etc., och för resultatpresentation, avses pågå kontinuerligt i nära internationellt samarbete och kopplat till de specifika krav som säkerhetsanalyserna ställer i olika skeden av FoU-programmet.

- En systematisk genomgång av de scenarier som bör ingå i en säkerhetsanalys, baserat till stor del på arbetet med SKB 91, kompletteras och avrapporteras i FoU-program 92.
- Under den närmaste 3-års perioden avses QA riktlinjer tas fram för bl a genomförande av dokumentation, hantering och lagring av data samt för programmering och dokumentation av datorprogram.

3.3 UTVECKLINGSLÄGE

3.3.1 Scenarier

Redan tidigt uppdelades analysen av förvarets funktion i scenarieanalys och konsekvensanalys. Scenarieanalysen omfattar såväl identifiering av möjliga scenarier som en beskrivning av vad olika scenarier innebär för förvarets funktion och sannolikheten för att de skall inträffa. Förutsättningen att inga relevanta scenarier skall ha försummas innebär stora krav på metodikens förmåga att på ett logiskt sätt fånga upp möjliga händelser och processer. Den första delen av arbetet, identifieringen av scenarier som är relevanta för säkerheten, har dock ofta gjorts på ett relativt ostrukturerat sätt.

Eftersom många aspekter av scenarier är globala, dvs oberoende av plats och förvarsutformning har SKB bedömt det väsentligt att utvecklingen inom detta område görs i nära internationellt samråd.

För att skapa en samsyn rörande identifiering av scenarier har SKB tillsammans med SKI under 1986/87 aktivt arbetat för att inom OECD/NEA initiera ett samarbete inom scenarieområdet. Sedan 1987 har en arbetsgrupp inom NEAs kommitté för radioaktivt avfall bearbetat dessa frågor. Metoder som använts av olika grupper i världen har insamlats och systematiserats. Syftet är att skapa en internationell överblick av tillgängliga metoder och diskutera deras för och nackdelar i en "state of the art" rapport. Ett preliminärt dokument bedöms kunna föreligga under 1990.

Det finns två principiella sätt att angripa problemet att identifiera en fullständig uppsättning scenarier. Antingen börjar man med att definiera samtliga händelser eller processer som kan påverka förvarets säkerhet, varefter en systematisk gruppering görs på basis av fysiskt rimliga kausalkedjor eller kopplade fenomen med tillräckligt hög sannolikhet. Dessa utgör sedan de valda scenarierna. Eller också definieras scenarierna direkt på basis av historisk eller geologisk erfarenhet eller på grundval av hypoteser för global eller regional utveckling. Därefter definieras, för varje scenario, de händelser eller processer av vikt för förvarets funktion som scenariet ger upphov till. Den första metoden sägs innebära att man går nerifrån upp i hierarkin, den senare att man går uppifrån ner.

Under 1988 och 1989 har SKI och SKB gemensamt prövat tillämpningen av en specifik nerifrån-upp metodik för scenariedefinition som utvecklats av Sandia National Lab i USA. Metodiken utvecklades ursprungligen för salt-förvar men har också tillämpats på ett förvar i basalt. I Sverige användes den på ett KBS-3 liknande förvar på en fiktiv förvarsplats. Erfarenheterna /3-1/ är att det är mycket svårt att enbart använda en ren nerifrån-upp metod. Valet av vad man gallrar bort och vad man behåller av de ursprungliga fenomenen baseras ofta på en intuitiv känsla för de scenarier man i ett senare skede skall komma fram till.

I granskningen av FoU-program 1986 rekommenderar SKN att SKB speciellt skall inkludera arbete med olika typer av intrång, dess orsaker och dess konsekvenser. Under arbetet med scenarier i allmänhet har SKB kunnat konstatera att handläggningen av intrångscenarier i säkerhetsanalysen i hög grad är beroende av

- om intrånget betraktas som avsiktligt eller oavsiktligt,
- den grad av återtagbarhet eller reparerbarhet som krävs eller eftersträvas för förvaret,
- samhällets förmåga att hålla information om förvaret tillgängligt över långa tidsperioder,
- utformningen av samhällets acceptanskriterier för ett slutförvar.

Ovanstående frågeställning påverkas också av hur IAEAs safeguard kommer att tillämpas på slutförvar för använt kärnbränsle. Ett möte hölls inom IAEA i denna fråga i september 1988.

Intrångscenariernas särställning bland scenarier i övrigt har också konstaterats inom NEA. En internationell workshop arrangerades i juni 1989 av NEA med rubriken "Assessment of the Risks Associated with Human Intrusion at Radioactive Waste Disposal Sites". Vidare har SKB föreslagit att frågan om vilka

krav som skall ställas på informationsbevarande skall tas upp i ett kommande nordiskt samarbete som skall ersätta det som tidigare finansierats genom nordiska rådet.

Med hänsyn till den starka internationella knytningen som dessa frågor har, och med hänsyn till pågående verksamhet och planer, har SKB bedömt det lämpligt att vänta med att påbörja direkta tekniska utvärderingar av olika scenarier för intrång.

3.3.2 Modeller och kopplingar

Kvantifierade prognoser av slutförvarets funktion förutsätter att de processer som är betydelsefulla för säkerheten kan modelleras. Beräkningsmodeller för källstyrka, temperatureffekter, grundvattenomsättning, kapselgenombrott, frigörelse av radionuklider i bränslet, nuklidtransport i närzonen, grundvattnets rörelsevägar i berget, grundvattnets transport av radionuklider, radionuklidernas växelverkan med sprickor och bergmatrix, utflödesvägar till biosfären samt radionuklidernas spridning i biosfären och resulterande doser till människan måste tillämpas i en sekvens.

Utveckling av beräkningsmodeller

SKB har ett antal datormodeller tillgängliga för olika beräkningar som behövs vid en säkerhetsanalys. Dessa modellers status och tillgänglighet samt den kommande utvecklingen framgår av en katalog över beräkningsmodeller. /3-2/ Katalogen omfattar både modeller som SKB har direkt tillgång till och modeller som SKBs konsulter har använt i olika projekt. Katalogen kommer successivt att kompletteras.

Vid remissbehandlingen av FoU-program 86 efterlyste några granskare en uttalad strategi för hur SKB avser att lösa behovet av och kontrollen över de stora beräkningsprogram som utgör viktiga verktyg i säkerhetsanalysen. Man framhöll att det är viktigt att SKB har en fortlöpande tillgång till de verktyg som utvecklas successivt under många år. Vidare är det angeläget att verktygen är samlade på en enda eller ett par datorer så att analyserna kan utföras på ett konsistent sätt med enkel överföring av data mellan program. För vissa analyser och problem krävs redan nu datorer med mycket stor beräkningskapacitet — sk superdatorer. SKB delar uppfattningen att det är viktigt att ha de för säkerhets- och funktionsanalysen centrala beräkningsprogrammen samlade på en dator. SKB anser det också angeläget att ha full tillgång till resultaten av de utvecklingsarbeten som ligger bakom programmen. Det är viktigt att inte vara helt beroende av enstaka konsulter. Ur kvalitetssäkringssynpunkt är det också viktigt att integrera databehandlingen.

Sedan mitten av 1980-talet har alla viktiga data från det geovetenskapliga undersökningsprogrammen samlats i en databas — GEOTAB. Denna finns lagrad på SKBs dator VAX 750. Detta är en relativt gammal modell, som dessutom är tidvis överbelagd. Den kan ej användas för program som kräver stor beräkningskapacitet.

För att tillgodose behovet av god tillgång på stor beräkningskapacitet har SKB anskaffat en egen dator av typ CONVEX 210. Denna bedöms täcka behovet för

de närmaste åren. Kapaciteten kan vid behov enkelt uppgraderas inom samma datorfamilj. Alla större beräkningsprogram körs in på denna dator och kommunikationslinjer upprättas till de konsulter som anlitas för större beräkningar och/eller programutveckling. Alla program körs in under operativsystemet UNIX för att förenkla utbyte med andra maskiner. Speciell vikt fästs vid utveckling av en integrerad överföring av data mellan program som används i serie inom en analys.

Genom att anskaffa en egen beräkningsdator uppstår följande fördelar:

- alla viktiga beräkningar kan köras på samma maskin.
- alla viktiga program finns under SKBs kontroll,
- SKB kan begära att konsulter anlitar SKBs maskin,
- utrymme skapas att inom rimlig kostnadsram göra betydligt mer omfattande simuleringar med dator,
- genom integrering av programsystemen skapas förutsättningar för en bra kvalitetssäkring av databehandlingen alltifrån mätvärden i laboratorier och på undersökningsplatser till slutresultat som direkt ingår i den säkerhetsrapport som skall ge grunden för erforderliga tillstånd från myndigheterna.

Beräkningsmodeller för källstyrka och barriärer

Med hänsyn till osäkerheten i prognoserna för framtida avfallsmängder torde dagens beräkningar av källstyrka i det använda bränslet kunna göras med tillräcklig noggrannhet via beräkningsmodellerna ORIGEN 2 eller CASMO/BEGAFIP. Inför framtagningen av underlag för lokaliseringsansökan kan, kring sekelskiftet, en validering av källtermen för vissa transuraner behöva genomföras.

Modellerna för kapselkorrosion, buffertens funktion och bränslelakning diskuteras i kapitel 5. Modeller för grundvattnets omsättning och rörelser i olika skalor diskuteras i kapitel 6. De kemiska förhållandena i närzonen och radionuklidernas speciering diskuteras i kapitel 7. Modeller för radionuklidens spridning i biosfären och doskonsekvenser av detta behandlas i kapitel 12.

Beräkningsmodeller för nuklidtransport i närzonen

I början av 1980-talet utvecklades ett antal modeller för att beräkna masstransporten i närområdet, dvs från det använda bränslet och förbi redoxfronten.

- Modell (analytisk och numerisk) för endimensionell instationär transport och sönderfall i bufferten.
- Modell för stationär tredimensionell transport genom buffert in genom spricköppningar i berget.
- Analytisk endimensionell modell för redoxfrontens vandring i bufferten.
- Modell (analytisk och numerisk) för redoxfrontens rörelse i en spricka (advektiv) och samtidiga indiffusion i bergmatrixen.
- En modell för en nuklids transport över redoxfronten inkluderande löslighetsbegränsad utfällning.

Dessa modeller är fortfarande användbara. En del kommer att vidareutvecklas.

En utveckling av kopplade modeller för geokemi och transport bedöms önskvärd. För en god beskrivning av bl a redoxfronten, öppning/läkning av sprickor, utvärdering av naturliga analogier mm krävs modeller som behandlar mer komplex kemi. En sådan modell bör inkludera komplexbildning, upplösning/utfällning, temperaturvariationer och sorption.

De modeller som tidigare använts bl a för betongdegraderingen i SFR och redoxfronten i Poços de Caldas, CHEMTRN och THCC /3-2/, klarar inte av att beskriva skarpa fronter särskilt väl. Räknetiderna är också mycket långa pga att programmen bygger på sk kopplad problemutformning. Här behövs en vidareutveckling.

Geokemiska jämviktsmodeller. Målet med geokemisk modellering är att få möjlighet att simulera radionuklidfrigörelse och migration ut från ett slutförvar. Ett slutförvar ger upphov till en temperaturhöjning i närområdet. Temperaturhöjningen påverkar i sin tur grundvatten och omgivande berg. Med en geokemisk modell kan dessa förändringar beräknas och den effekt de har på förvaret. Med geokemiska modeller beräknas också hur frigörelsen av radionuklider från ett förvar påverkas av bränslets och grundvattnets sammansättning och det omgivande berget.

I geokemiska modeller används fysikalisk-kemiska principer för att tolka de geologiska processerna. Modellerna utnyttjar matematisk tolkning av teoretiska koncept och beräkningarna växer kraftigt för system med många komponenter. Det är därför nödvändigt att använda datorer med hög beräkningskapacitet för att lösa det stora antalet kopplade ekvationer.

Det geokemiska datorprogram som är mest generellt är EQ3/6-paketet, konstruerat av Wolery /3-3/ och vidareutvecklat /3-4/. Detta programpaket är färdigt för att användas och finns implementerat på SKB-datorer. Det har använts med framgång för att simulera såväl fält- som labbförsök vid ett flertal tillfällen.

Även om dagens geokemiska modeller är omfattande och väl validerade och verifierade finns det processer, vilka är viktiga i ett slutförvar, som kan behandlas på bättre sätt. Därför krävs utveckling inom vissa områden, bl a kinetik, sorption och termodynamiska data.

Beräkningsmodeller för nuklidtransport i geosfären

Den generation av transportmodeller som användes för fjärrzonen i KBS-3 beräknade transporten av nuklider från närzonen fram till närmaste sprickzon. En advektions-dispersionsmodell utnyttjades kompletterad med ytsorption, diffusion i i bergets öppna mikrosprickor samt kedjesönderfall.

Utvecklingen har fortsatt med bland annat en starkare koppling mellan de geohydrologiska beräkningsmodellerna, vilka ger strömbanor från en förvarsplats, och transportmodellen. Kunskapen om sprickzoner och fördröjningspotentialen i dessa har förbättrats och bedöms nu möjliggöra en modellering av transport även i dessa. Även de kemiska data som behövs vid

modelleringen har förbättrats, se vidare i kapitel 7.

Observationer i berg av vattenflödets kanalisering och snabba transportvägar har lett till utveckling av speciella kanalströmningsmodeller för beräkning av nuklidtransporten. En sådan beräkningsmodell har använts vid säkerhetsanalyserna av SFR och WP-Cave. För en vidare utveckling av kanalströmningsmodellen behövs mer fältdata från tunnlar och djupa hål. Modellerna kommer prövas i samband med spärförsök.

Den nätverksmodell som utvecklas inom Stripa-projektet kan utnyttjas både vid flödes- och transportberäkningar. Modellerna är dock ännu på forskningsstadiet och kan först på sikt bli av nytta vid säkerhetsanalysen.

Utflödet från geosfär till biosfär diskuteras i kapitel 12.

PROPER

Ett huvudproblem för säkerhetsanalysen är att det kan finnas en avsevärd osäkerhet i vissa ingångsdata, beroende bl a på en naturlig variation eller på mätosäkerheter. För att kunna utvärdera hur osäkerheten i ingångsparametrar överförs till osäkerheter i beräknade konsekvenser har ett programpaket PROPER utvecklats inom SKB.

Syftet med programpaketet PROPER är att förse funktionsanalytikern med en datoriserad metod för att studera hur osäkerheter i indata fortplantas i modellberäkningarna.

Kärnan i PROPER-paketet är den sk monitorn som används för att

- koppla ihop ett antal undermodeller, hämtade från ett bibliotek vid körningstillfället, till en totalmodell för det aktuella problemet,
- propagera indataparametrarnas osäkerheter genom sekvensen av undermodeller.

Detta uppnås utan något ingrepp i källkoderna till monitorn eller undermodellerna. Samma monitor kan använda olika uppsättningar av undermodeller.

Varje undermodell utgör en separat programmodul. Antingen ett internt FORTRAN subprogram eller ett externt FORTRAN program. Monitorn kontrollerar exekveringen av varje sådan modul och samlar råstatistik. Modulariseringen möjliggörs av att kommunikationen mellan undermodellerna sköts via en intern databas som skapas temporärt under simuleringen.

Fördelningar i indata överförs till fördelningar i resultatet med Monte Carlo teknik genom upprepad stickprovstagning. Monitorn tillhandahåller flera styrmekanismer relaterade till stickprovsproceduren, bl a valfria variansreducerande metoder samt upprepad mätning av precisionen, utförd under körning, och jämförelse med valfria kriterier för automatiskt avbrytande av simuleringen. Korrelationer mellan parametrar kan införas.

Monitorn finns nu i en helt färdigtestad version 1.0 /3-5/, och kommer att utnyttjas i anslutning till SKB 91. Eftersom monitorn bara samlar råstatistik måste därutöver separata efterbearbetningsprogram användas. För närvarande finns tre olika program tillgängliga för känslighetsanalys och grafisk presentation /3-5/.

Undermodeller har utvecklats i enlighet med de tidplaner som gavs i FoU-program 86 för att ge möjligheter till generiska bedömningar och för att visa på metodikens möjligheter. Den nyligen utvecklade första generationens undermodeller /3-6,7/ tar hänsyn till kedjesönderfall och ligger allmänt på en komplexitetsnivå motsvarande den i KBS-3. Närzonsmodellen betraktar en kopparkapsel och tar hänsyn till diffusiv materietransport, kapselkorrosion, löslighetsbegränsningar och lättillgänglig aktivitet (i kapslingsspalt och korngränser). Fjärrzonsmodellen beaktar advektiv och dispersiv transport samt diffusion och sorption i bergmatrisen kring ett strömrör.

Ett nära internationellt samarbete för vidareutveckling av probabilistiska modeller av ovan diskuterad typ pågår inom OECD/NEA, se avsnitt 13.11.1.

3.3.3 Platsspecifika databaser

I GEOTAB /3-8/ finns data från SKBs samtliga platsundersökningar inlagda. Ytterligare ytbaserade platsundersökningar eller kompletteringar av gamla undersökningar kommer att genomföras på tre kandidatplatser åren 1992-94. Databaser för möjliga slutförvarsplatser kommer därvid att byggas upp. Vissa rutiner för QA har etablerats /3-9, 10, 11, 12/ och kommer att ytterligare kompletteras.

Information från förundersökningarna för berglaboratoriet vid Oskarshamn kommer att användas för att prognosera områdets egenskaper på förvarsdjup, se kapitel 9. Prognosernas validitet kommer sedan att prövas via data från drivningen av nedfartstunneln och utbyggnaden av berglaboratoriet. Erfarenheterna från dessa studier kommer att ligga till grund för att definiera omfattningen av nödvändiga undersökningarna på kandidatplatserna.

Med hjälp av SKB 91 och platsspecifika data från kandidatplatserna kommer betydelsen av eventuella skillnader att utvärderas, och utgöra en del av underlaget för inför de detaljerade geologiska platsundersökningarna.

3.3.4 Kriterier och myndighetskrav

I granskningen av föregående FoU-program konstaterar SKN att inga direkta insatser anslutna till beslutskriterier definierats i SKBs 6-års program. SKN ansåg att SKB bör ta fram underlag för berörda myndigheters arbete med beslutskriterier, samt att en redogörelse av arbetet med beslutskriterier bör ingå i FoU-program 89.

Eftersom SKB endast underhand fått viss information om det pågående myndighetssamarbetet i Norden att utse rekommendationer för utformning av slutförvar, har någon inriktning av insatserna att direkt motsvara specifika kriterier inte kunnat göras under den gångna 3-års perioden. Arbetet har därför inriktats mot att på ett generellt sätt beröra viktiga frågeställningar inom området. Exempel på sådana är:

— scenarier; hur skall det kunna visas att den uppsättning scenarier som studerats är fullständig? Se avsnitt 3.3.1,

- validitet; hur etableras validitet och på vilket sätt skall det fastslås att de utnyttjade modellerna är tillräckligt valida för sitt ändamål? Frågan är under bearbetning av flera grupper, se avsnitt 3.3.5,
- probabilistisk modellering; hur kan man ta hänsyn till att vissa parametrar av betydelse för säkerheten i ett slutförvar utgörs av fördelningar? Se avsnitt 3.3.2,
- ALARA-principen; hur skall säkerhetskrav balanseras mot samhällets ekonomiska resurser att påverka individernas riskbild i stort? /3-13/

Inga av dessa områden är dock av sådan natur att en tidpunkt kan ges för när arbetet kan ha nått sådan kvalitet att insatserna kan avbrytas. En successiv fokusering av insatserna är nödvändig i takt med att regelsystemet växer fram. Insatsernas omfattning måste ständigt anpassas till potentialen för vidareutveckling, samt myndigheternas vilja att formalisera kraven i direkta kriterier.

En diskussion om hur SKB på lämpligaste sätt skall kunna stödja myndigheternas utveckling av ett kriteriesystem tas lämpligen upp efter det att de nordiska rekommendationerna publicerats.

3.3.5 Tilltro

För att en säkerhetsanalys skall kunna utgöra grund för ett beslut att slutförvaret är acceptabelt säker måste en bedömning göras av hur känsligt resultatet är för osäkerheter i analysen eller variationer i olika förutsättningar. Den trovärdighet som kan förlänas en bedömning beror i hög grad på det analyserade systemets förutsägbarhet och analyserbarhet.

De metoder som för närvarande finns tillgängliga för att bedöma inverkan av parameterosäkerhet i modellberäkningar kan grovt delas upp i stokastiska och deterministiska.

Stokastisk simulering används i datorprogram som PROPER och det kanadensiska SYVAC för att direkt överföra fördelningar för indata till fördelningar för resultaten. Stokastisk simulering används också för att, exempelvis vid en hydrologimodellering, med hjälp av en skattad rumslig varians ta hänsyn till att bergets egenskaper inte är strikt kända i andra punkter än där mätningar gjorts.

Kriging är en statistisk interpoleringsmetod som utvecklats för malmprospektering och används nu också i samband med hydrologisk modellering. Resultaten erhålls dock utan något simuleringsförfarande.

En deterministisk procedur med vars hjälp ekvationssystemets känslighetsderivator kan erhållas direkt numeriskt har utvecklats av en grupp vid Oak Ridge National Laboratory i USA. Metodiken prövas för närvarande av kärnkraftinspektionen och kommer också att utvärderas av SKB. Den förefaller dock mindre lämplig i de fall man har att räkna med stor variabilitet i ingångsparametrarna.

Ett av huvudsyftena med SKB 91 är att på ett detaljerat sätt analysera ett referensfall kring vilket variationsanalyser och sensitivitetsstudier skall kunna genomföras. Dessa analyser kommer att utnyttjas under 90-talets början som stöd för lokalisering av slutför-

varet och vid valet av utformning och system under 90-talets mitt.

Tilltron till hur väl modeller kan beskriva verkligheten karakteriseras med begreppet validitet. Validitet är i allmänhet inget absolut begrepp, utan måste relateras till det ändamål som modellen används för.

Validitet etableras genom att modellens förutsägelser jämförs med försök i olika parameterområden från väldefinierade laboratorieexperiment till sk naturliga analogier. Begreppet validitet diskuteras för närvarande i flera sammanhang, i anslutning till valideringsövningar i Stripa, se kapitel 10, och vid berglaboratoriet, kapitel 9, i anslutning till studiet av naturliga analogier, kapitel 11, samt i det internationella samarbetet i INTRAVAL, kapitel 13. Den praktiska innebörden av begreppet validitet måste ytterligare belysas i dess olika användningsområden innan en internationell samsyn har etablerats för hur det skall användas i slutförvarssammanhang.

Tilltron till resultatens giltighet påverkas av modellernas validitet men också av databasens och beräkningsarbetets kvalitet. SKB avser under den kommande 3 års perioden att fortlöpande bearbeta kvalitets-säkringsfrågorna inför lokaliseringsbesluten och systemvalen.

3.4 PROGRAM

3.4.1 1990-1992

SKB 91

Den detaljerade beskrivningen av det underlag som skall tas fram till SKB 91 framgår av en arbetsrapport /3-14/. Likaså de analysmetoder som avses användas och tidplanerna för detta. Denna arbetsrapport kommer successivt att revideras allt eftersom underlagsmaterial framkommer och dess kvalitet bättre kan bedömas. Nedan ges en översiktlig plan för arbetet.

Den tänkta anläggningen kommer att utformas ungefär som den i KBS-3, dvs ett 1 km³ stort förvar på ca 500 meters djup där inkapslat avfall deponeras i speciellt borrade deponeringshål.

Analysen baseras på geodata från Finnsjö-området kompletterat med viss information från SFR. För platsen aktuell geokemi och topografi utnyttjas. Nuklidinventariet uppdateras mht uttaget bränsle och nuvarande prognoser om framtida utbränning. Temperaturen begränsas till max 100 °C.

De modeller som avses komma till användning skall i princip vara definierade och fungerande tidigt under 1990. Framtagning av kompletterande dokumentation och sammanställning av dataunderlag sker med samma tidshorisont. För att undvika att beräkningar i olika skeden av analysen blir inkompatibla kommer förutsättningar, modeller och dataunderlag att låsas från 1990-07-01, dvs inga nya modellversioner införs och databasen förändras i princip inte.

Beräkningsarbetet och utvärderingen av resultaten kommer att göras under andra halvåret 1990 och första halvåret 1991. En genomgång och definition av scenarier görs till tidigt 1990, varefter intressanta variationer kan definieras successivt under 1990. I anslutning till

analysen kommer försök att göras för att systematiskt kvantifiera osäkerheter av olika slag, och för att utvärdera deras betydelse. Arbetet med att studera betydelsen av variationer i indata kommer att fortsätta även efter det att SKB 91 avrapporteras. Den utgör då en fortlöpande redovisning av betydelsen av de säkerhetsrelevanta parametrarna anpassad till den övriga verksamheten. Under 1992 kommer variationsstudierna att koncentreras på material som kommer fram från platsstudierna.

Variationsanalyser förväntas också komma att initieras av myndighetsfrågor kring SKB 91.

En sammanfattande rapport kommer att publiceras under fjärde kvartalet 1991.

Beräkningsprogram för närzonstransport

Jämviktsmodeller. SKB samarbetar med Lawrence Livermore National Laboratory på utveckling av den geokemiska koden EQ3/6. Under 1990 kommer ytkomplexering att läggas in i modellen. Det pågående arbetet med att validera den termodynamiska databasen kommer att fortsätta och målet är att ha utvärderade data för U, Pu, Tc, Np, Am och Th inför SKB 91.

Närzonstransport. Under 1989-90 kommer sensitivitetsstudier att göras på närzonsmodellerna från KBS-3 för att se var ytterligare utveckling är nödvändig. Redoxfrontsmodellerna kommer att kopplas för att kunna beräkna redoxfrontens vandring genom bufferten och ut i berget. Under 1991 kommer beräkningar och variationsanalyser att göras för SKB 91.

Kopplade modeller för geokemi och transport. En ny modell som beskriver fronters vandring i närzonen kommer att utvecklas med start i slutet av 1989 och under ett par år framåt. Denna modell skall användas som ett komplement till nuvarande modeller.

Alternativ närzonsutformning. Jämförelsestudier mellan olika närområdesutformningar kommer att påbörjas när SKB 91 är avslutad.

Beräkningsprogram för fjärrzonstransport

Databasen för den kanalströmningsmodell som användes vid SFR- och WP-Cave-analyserna kommer att vidareutvecklas. Under perioden kommer data om grundvatteninflöde att insamlas från tunnlar, schakt och djupa hål och analyseras med avseende på information rörande kanaliseringsgrad.

Utvecklingen av de modeller som använts för beräkning av nuklidtransport i stokastiska tvådimensionella sprickor fortsätter. Möjlighet att ta hänsyn till matrisdiffusion ska införas. En vidareutveckling sker för att erhålla en kanalmodell med stokastiska transportegenskaper vilken ska kunna ingå i tredimensionella nätverksmodeller. I denna ska, till skillnad från kanalströmningsmodellen, kanalerna kunna mötas, blanda vatten och dela sig.

Utveckling av modeller för beräkning av grundvattenflöde i diskreta sprickor sker inom Stripa-projektet, se avsnitt 10.2.2. Till en av dessa modeller, NAPSAC — se avsnitt 6.2.3, kommer en enkel transportmodell att inkluderas under 1990/91. På sikt kan dessa beräkningsmodeller komma att bli tillämpade inom säkerhetsanalysen.

Vilken av ovan nämnda transportmodeller som kommer att användas i SKB 91 är ännu ej möjligt att säga.

PROPER

Metodutvecklingen inom PROPER är svår att tidplanera då de önskvärda insatserna huvudsakligen kommer att definieras av erfarenheterna från användningen av paketet i samband med SKB 91. Vissa mindre insatser kan dock identifieras redan idag.

En hel del "overhead" finns i systemets sätt att sköta kommunikationen mellan undermodellerna. En ny version av PROPERs monitor kommer därför att produceras. Version 2 avses bli mera lättanvänd och flexibel. Arbetet planeras vara klart till mitten av 1990.

Utvecklingen av ett nytt integrerat program för efterbearbetning har inletts. Skärmhanterare och menystyrning kommer att införas för större användarvänlighet. Detta arbete avslutas i mitten av 1990.

Under andra halvan av 1990 och under 1991 planeras insatser rörande statistiska metoder för efterbearbetning samt utveckling och testning av variansreducerande metoder.

Som hjälp till modellkonstruktörer förutses fortsätta insatser för utveckling av numeriska metoder och produktion av servicerutiner. Sådana metoder och rutiner har hittills främst tagits fram i samband med utvecklingen av demomodellerna. Nya demomodeller kan behöva utvecklas för att demonstrera vissa typer av problemlösningar. Insatser av denna typ kan behöva bedrivas fortlöpande och kommer att anpassas till behov uppkomna vid användningen av PROPER.

Scenarioutveckling

Metodutvecklingen inom scenarieområdet kommer att anpassas till den pågående verksamheten inom NEA samt anpassas till behovet av säkerhetsanalyser och variationsstudier inom FoU-programmet i stort.

Bearbetningen av erfarenheter från olika internationella aktiviteter om scenarier kommer att utgöra en grund till hur scenarier redovisas i SKB 91, och till vilken nivå de kommer att bearbetas. SKB avser att till SKB 91 definiera ett lämpligt referensscenario, samt de scenarier som därutöver bör vara konstruktionsstyrande.

de. Den senare frågan är dock i viss grad avhängigt av hur de svenska acceptanskriterierna kommer att formuleras. En uppsummering av läget planeras till FoU-program 92.

Acceptanskriterier

Under 1990 förväntas de nordiska myndigheternas diskussion rörande acceptanskriterier för anläggningar för slutförvaring av radioaktivt avfall komma att redovisas. Materialet måste analyseras med avseende på de konsekvenser det kan ha på säkerhetsanalysernas genomförande.

Kvalitetskrav och kvalitetskontroll

En systematisk genomgång skall göras under 1990-1992 för att etablera QA-riktlinjer anpassade till verksamhetens utvecklingsläge. I första hand gäller det hantering, lagring och dokumentation av data och programmering och dokumentation av datorprogram.

3.4.2 1993-1995

Under 1993, och ev en bit in på 1994, kommer ytterligare variationsstudier att genomföras för kandidatplatserna och för gallringar av alternativen för förvarets utformning och barriärer. Insatserna koncentreras i början (perioden 1992-94) på sådana faktorer som kan utgöra krav på en lokaliseringsplats, t ex behov av totalt utrymme och sammanhängande form. Under perioden 1995-97 skall resterande underlag för val av systemutformning för närzonen tas fram.

Under perioden kommer data från berglaboratoriet och andra platsundersökningarna att möjliggöra en vidareutveckling av fjärrzonsmodellerna. Motsvarande utveckling av närzonsmodeller kan komma att behövas med anledning av nya barriärtyper etc.

Metodutveckling inom säkerhetsanalysens område anpassas generellt till uppkomna behov och möjligheter till vidareutveckling.

Då detaljundersökningar planeras starta under 1995 av kandidatplatser för slutförvaret, kommer under 1994 den säkerhetsmässiga betydelsen av att gå ner till förvaringsnivå med schakt eller tunnel i olika delar av undersökningsområdet belysas.

4 UTFORMNING AV FÖRVAR

4.1 ALLMÄNT

Regeringens godkännande av KBS-3 1984 innebär att det idag finns en metod för slutförvaring av använt kärnbränsle som uppfyller samhällets krav på säkerhet och strålskydd. Pågående FoU syftar till att ta fram ett tillräckligt underlag för lokalisering och att, bland möjliga alternativ, välja lämplig utformning som underlag för en lokaliseringsansökan. I dessa alternativstudier utgör KBS-3 utformningen ett referensalternativ, se Figur 4-1. Endast alternativ som erbjuder fördelar inom ett eller flera av följande områden

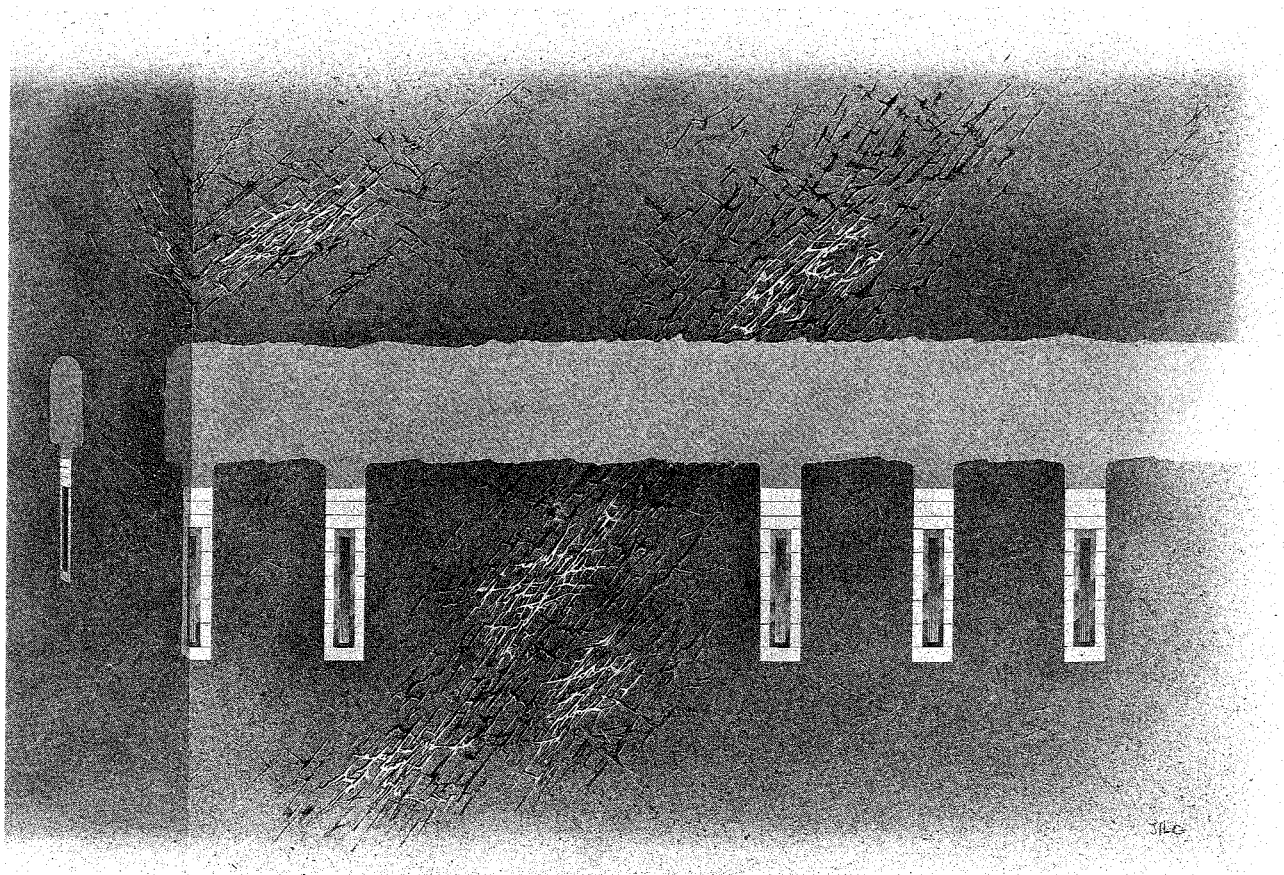
- teknisk genomförbarhet,
- kostnadseffektivitet,
- radiologisk säkerhet och utvecklingspotential,
- tilltro till säkerhetsbedömningen,

kommer att studeras. Allt eftersom förvarsutformningen utvecklas kommer FoU inriktningen att anpassas för att stödja den uppbyggnad av databaser och ut-

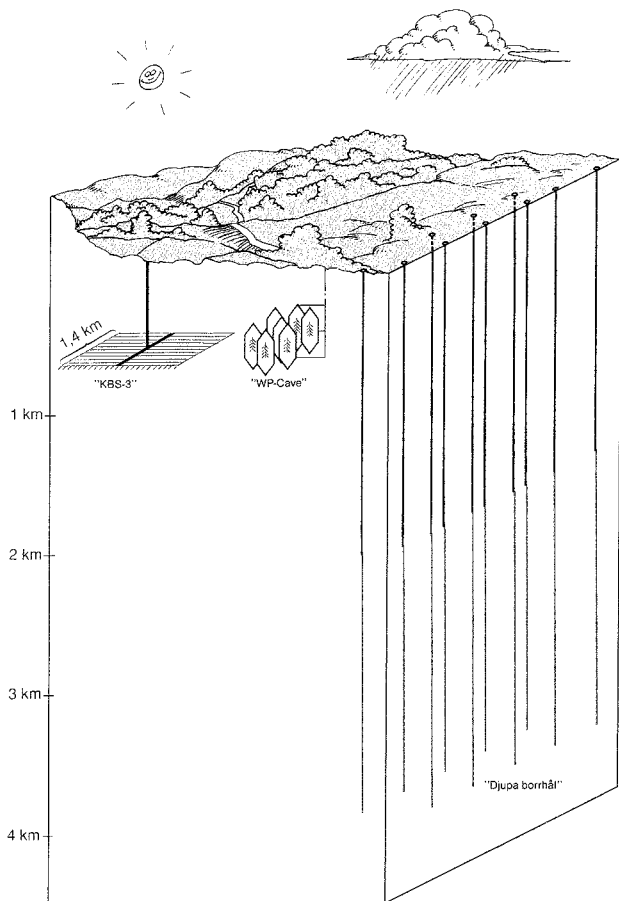
veckling av modeller som erfordras. I FoU-program 86 diskuterades olika alternativ för förvaring av använt kärnbränsle /4-1/. Bl a konstaterades att det fanns möjligheter att förvara avfall under övervakning och kontroll. CLAB utgör ett tillfälligt förvar där lagringstiden vid behov skulle kunna ökas från den nu antagna 40-årsperioden till 100 år /4-2/.

En möjlighet till helt torra förvar diskuterades också. Därvid konstaterades att detta, under nuvarande svenska förhållanden, förutsätter en fungerande dränering, med åtföljande långsiktig kontroll av dräneringens funktion. SKB konstaterade 1986 att det var nödvändigt att klarlägga samhällets syn bl a på system som för sin långsiktiga säkerhet är beroende av övervakning.

I sin granskningsrapport /4-3/ bedömer SKN att sådana system bör ges låg prioritet eftersom möjligheterna att visa systemens långsiktiga säkerhet är små. SKB delar den synpunkten och planerar inte att stude-



Figur 4-1. Slutförvar enligt KBS-3 metoden medger goda möjligheter för anpassning till växlande bergförhållanden.



Figur 4-2. Principiella alternativ till slutförvarsutformning.

ra system som för sin säkerhet kräver långsiktig tillsyn och underhåll. Detta innebär dock inte att studerade förvarsutformningar inte kan hållas under övervakning om detta skulle bedömas önskvärt, eller att möjligheter för framtida generationer att vidta förändringar i förvaret skall förhindras eller försvåras.

4.2 MÅL

Målet är att vid mitten av 1990-talet kunna välja principiell slutförvarsutformning. Detta system optimeras sedan med avseende på bl a temperatur, kapsel och tätningsåtgärder i valt slutförvarsläge.

4.3 ALTERNATIVA UTFORMNINGAR

Sedan 1986 års forskningsplan har i jämförelse med KBS-3 två principiellt olika slutförvarsalternativ studerats. Dessa är "WP-Cave" och "Djupa borrhål", se Figur 4-2.

De medel som användes i strävan att isolera använt bränsle från biosfären är val av plats i berget, inkapsling och åtgärder för att ge kapslar en god förvarsmiljö i berget. En god utformning skall medge att tillgänglig teknik för inbyggnad av de tekniska barriärerna, kap-

sel, buffertmaterial och återfyllning med tätningsåtgärder kan anpassas till bergets förutsättningar för isolering.

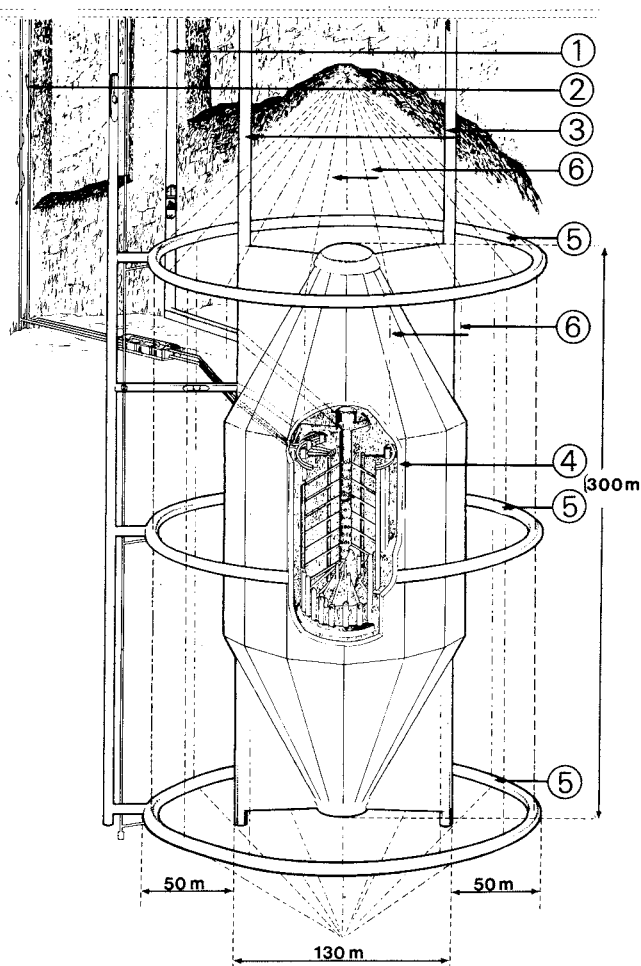
4.3.1 WP-Cave utformning

WP-Cave bygger på en ingenjörsmässig utformning av barriärer, vilka anpassas till rådande bergförhållanden.

Den utformning som utvärderades av SKB under två år, och som tidigare bearbetades av SKN i NAK-WP-Cave-projektet /4-4/, förutsätter bl a:

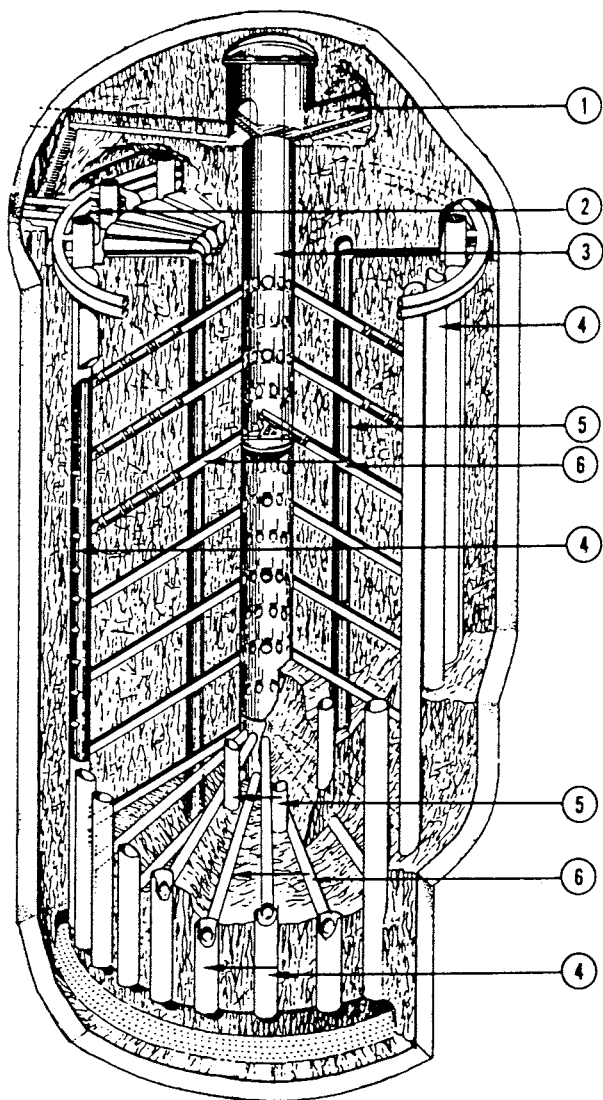
- kapslar av stål,
- fem meter mäktig bentonit-sandbarriär med 10% bentonit i bottendelen, 20% i de cylindriska delarna och 50% i de översta delarna,
- hydraulisk bur.

Den studerade utformningen av WP-Cave framgår av Figur 4-3. Det använda bränslet placeras i centrum av anläggningen och omges av en barriär av berg. Runt



1. Schakt för avfallskapslar
2. Ventilationsschakt
3. Schakt för uttag och återfyllning av bentonit/sandbarriären.
4. Bentonit/sandbarriär med en mäktighet på ca 5 m
5. Ort i den hydrauliska buren
6. Borrhål i den hydrauliska buren

Figur 4-3 Utformning av WP-Cave



1. Utrymme för stora avfallskollin
2. Värmeväxlare
3. Centralschakt
4. Yttre ventilationsschakt
5. Inre ventilationsschakt
6. Kapselkanal

Figur 4-4 WP-Cave-förvarets lagerdel.

denna sprängs en slits ut, som återfylls med en blandning av bentonit och sand. Utanför bentonit-sandbarriären arrangeras en sk hydraulisk bur, vilken består av horisontella orter sammanbundna av vertikalt borrade dräneringskanaler.

Storleken av WP-Cave kan varieras. En WP-Cave som beräknas kunna rymma bränsle motsvarande 1 100 ton U, dvs 1/7-del av det svenska programmet, har de mått som framgår av Figur 4-3. Denna storlek benämns WPC 1100.

Den centrala delen av förvaret, där bränslet lagras, visas skissartat i Figur 4-4. Från ett schakt i mitten sträcker sig lagringskanaler radiellt utåt men i ca 30° lutning neråt. På varje nivå finns det plats för tolv sådana kanaler. Deras diameter är så pass mycket större än bränslekapslarnas, att plats finns för kylfluten att passera.

Kylluften cirkulerar neråt i de yttre vertikala schakten, igenom kapselkanalen och uppåt i de inre schakten. Efter värmeväxling återcirkuleras luften.

I WPC 1100 lagras två kapslar i rad i varje kanal. Varje kapsel rymmer 16 BWR-element eller 5 PWR-element. Räknat på BWR-element är vikten per kapsel ca 2,9 ton U. Detta betyder att 1 100 ton U fordrar 16 nivåer (384 kapslar). Höjden i det inre förvaret blir härvid ca 110 m, om avståndet mellan varje nivå av lagringskanaler är 3,5 m i vertikalled.

Kapseln förutsättes vara av stål med låg kolhalt.

Alla lagringskanaler och schakt förutsättes bli klädda med stålinfodring, för att trygga en dammfri miljö i alla ventilationskanaler. Betong används inte, eftersom detta material ej bedöms medföra någon speciell fördel ur säkerhetssynpunkt på lång sikt.

Bergmassan mellan det centrala lagerutrymmet och bentonit-sandbarriären skall skydda bentoniten från att bli alltför varm. Kravet är att temperaturen ej stiger till mer än 80°C i bentoniten. Detta har resulterat i de presenterade måtten i Figur 4-3, vilka dock är något konservativt tilltagna. Förutsättningen vid bestämningen av antalet kapslar i varje lagringskanal är att temperaturen ej stiger till mer än 150°C på kapslarnas yta. Skulle tre kapslar placeras i varje lagringskanal stiger temperaturen på kapslarnas ytor till mer än 200°C, men fortfarande ej över 80°C i bentoniten.

Vid förslutning, efter ca 100 års ventilation och övervakning, återfylls allt öppet utrymme innanför bentonit-sandbarriären med finmald sand, finare än 0,1 mm, och vatten. Anledningen är att man härigenom skapar en kemisk miljö som kan beskrivas med god noggrannhet.

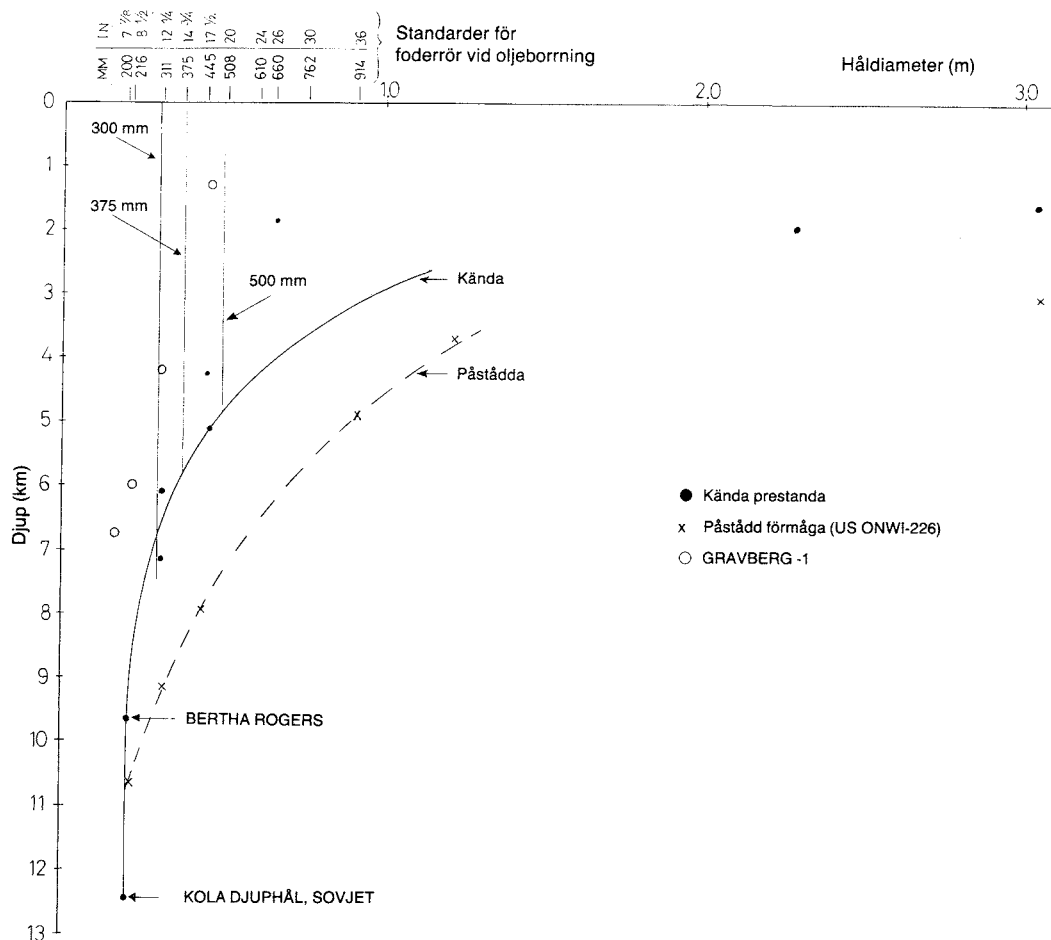
4.3.2 Djupa borrhål, utformning

Utnyttjande av modern teknik för djuphålsborrning har föreslagits som en metod att förvara avfall på mycket stora djup i berget.

Tillgänglig borrningsteknik begränsar diametern på hål med djupet, se Figur 4-5. Erfarenheter av borrning till stort djup i svensk berggrund har vunnits i samband med försöken att finna gas i Gravberg vid Siljan. Dessa har utnyttjats för att studera möjligheten att använda djuphålstekniken för deponering av använt kärnbränsle.

Berggrunden vid Gravberg är sprickig till 900 m djup. Sprickzoner, 2—20 m mäktiga, finns därunder med typiska medelavstånd av 200—300 m. Hydrauliska konduktiviteten i berget vid 1,5-3 km djup är 10^{-10} till 10^{-9} m/s.

Det 12 km djupa Kolahalvö-hålet har rapporterats ha en hydraulisk konduktivitet 10^{-12} m/s vid 6 km djup och borrhålet vid Cajun Pass, Kalifornien 10^{-12} m/s vid ca 2 km djup. I Kolahalvö-hålet observerades ett större inflöde av salt vatten vid 4,5 km djup. Vid större djup är också känt från finsk och svensk berggrund. Det är således inte att förvänta att berggrunden på stort djup normalt är tät. Närvaro av annat grundvatten i den övre 700 till 1000 m djupa delen och mer konduktiva flacka zoner kan medverka till att vattenomsättningen på stort djup är begränsad.



Figur 4-5 Uppnådda och påstådda grovlekar på borrhål vid olika djup.

Erfarenheterna från Gravberg visade att besvärligheter vid borrning ökade snabbt vid djup större än 5 km /4-5/. Studierna är nu inriktade mot att utvärdera mer detaljerade utformningar av deponeringshål med djup 4-5,5 km, diameter 0,4-0,8 m, se Figur 4-6, samt hur grundvattenrörelser orsakade av termisk konvektion kan modelleras med förväntad kvalitet i hål och i omgivande berg. Härvid förutsätts det använda bränslet bli deponerat i kapslar placerade på mer än 2 km djup och under en tätpluggad övre del.

4.3.3 Byggmetoder

Deponeringshål skall ge utrymme för kapslar och buffertmaterial som i samverkan med berget ger en närzon med begränsad vattenomsättning. Teknik för att ta fram deponeringshål kan vara kärnbörning eller slående eller roterande borrning. Ingen direkt lämplig utrustning finns idag och erfarenheten av eventuell påverkan av omgivande berg av betydelse för isoleregenskaper är liten. I Stripa ingår utveckling av teknik för tätning av sprickor från bla deponeringshål utförda med kärnbörning i halvskala. Det är inte troligt att teknik för borrning av deponeringshål utvecklas för annat ändamål inom överskådlig tid. I SKBs FoU-program ingår sådan utveckling med mål att identifiera sammanhang mellan metoder för håltagning och

eventuell påverkan av berget. Ett förslag till metod att prövas i fältskala utarbetas, vilket kommer att ligga till grund för framtagning av utrustning och senare praktiska prov i berglaboratoriet.

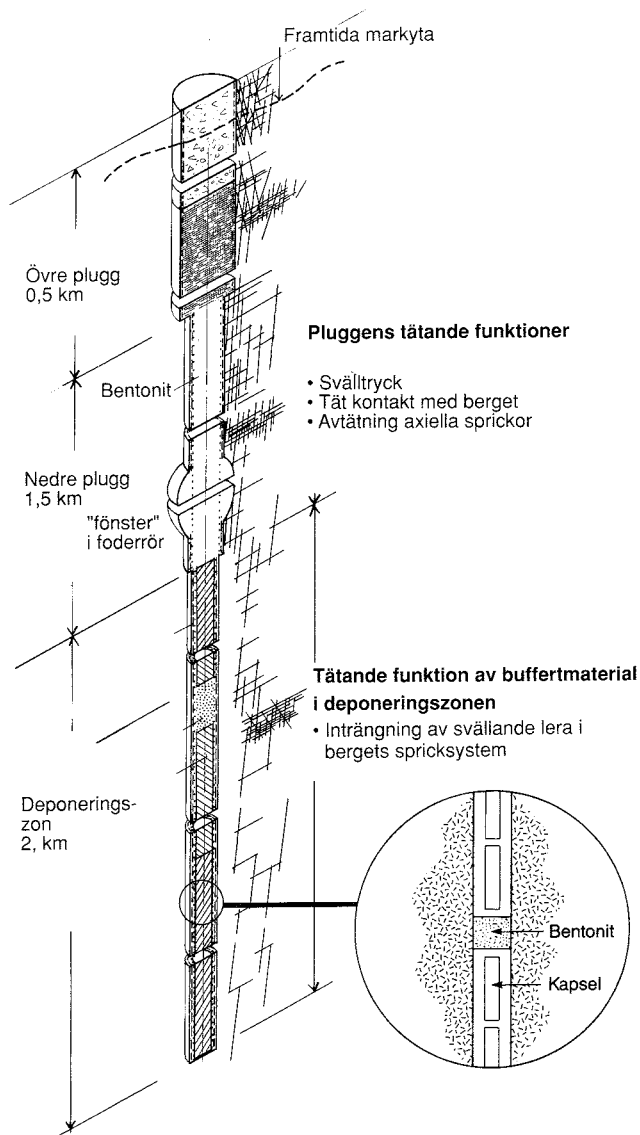
4.4 ALTERNATIV-JÄMFÖRELSE

4.4.1 WP-Cave

En jämförelse har genomförts mellan KBS-3 och WP-Cave /4-6/. De representerar i första hand två olika principer vad gäller koncentrationen av det använda bränslet i förvarsberget. Jämförelsen syftade till att ge underlag för en prioritering av inriktningen av den framtida forskningen inom SKB.

Jämförelsen resulterade i följande bedömning:

- Båda koncepten bedöms kunna ge acceptabel säkerhet.
- Ett utnyttjande av WP-Caves potential torde dock kräva en omfattande insats för modellutveckling på områden där förståelsen och dataunderlaget idag är ofullständigt. Detta gäller speciellt långtidsstabiliteten i grundvattnets strömningsvägar i de temperaturfält som finns innanför och utanför bentonitbarriären.



Figur 4-6 Djupt deponeringshål. I samband med borrhning och deponering utförs tätningssåtgärder med svällande leror.

- De högre temperaturerna i WP-Cave medför, via osäkerhet i data och dominerande processer, en ökad osäkerhet i de beräknade konsekvenserna. För att reducera dessa osäkerheter erfordras en mång-årig internationellt samordnad insats.
- Båda förvaren, inklusive de ingående barriärerna, bedöms kunna byggas med en normal anpassning av tillgänglig teknik.
- På icke platsspecifika grunder kan det inte idag sägas om det skulle vara lättare att finna lämpliga förläggningsplatser för den ena utformningen eller den andra.
- WP-Cave utformningen är avsevärt dyrare.

En framtida forskningsinriktning på koncentrerad inlagring av använt bränsle på ett distribuerat sätt enligt WP-Cave bedöms därför innebära större osäkerhet rörande möjligheterna att åstadkomma acceptabel säkerhet, samtidigt som kostnaderna skulle vara högre. Studierna av WP-Cave som ett sammanhållet system kommer därför inte att fortsätta.

Ett antal i WP-Cave ingående barriärer, kommer dock att studeras vidare i FoU programmet. Exempel

är betydelsen av järn i förvaret i form av kapslar eller konstruktionselement, och betydelsen av preferentiella strömningsvägar oavsett om de skapats avsiktligt (som i en hydraulisk bur) eller oavsiktligt (som vid spänningsomlagring vid håltagning i berg).

Metoder för hur successiva bergundersökningar vid utbyggnaden av ett slutförvar skall kunna utnyttjas vid inplacering i ett simulerat typberg av SFR-karaktär har börjat studeras, se kapitel 6. Vid förvarsutbyggnaden successivt insamlad information om bergkvalitet kan i högre grad utnyttjas för inplacering av KBS-3, på grund av dess distribuerade karaktär, än för inplaceringen av WP-Cave som kräver en fastställd geometri för dess olika delar.

4.4.2 Djuphål

Möjligheterna att förvara avfall i borrhål på stort djup har studerats på basis av den information som framkommit vid djuphålsborrningar. De preliminära resultaten visar på en gynnsam ekonomi. Det finns dock inte i dag ett underlag som tillåter en klar jämförande värdering av djuphålskonceptet som alternativ. Studierna kommer att fortsätta.

4.4.3 Övrigt

Vad gäller alternativa förvarsutformningar i övrigt studeras kapselmateriell, buffertmaterial och kemisk konditionering av närområdet inom respektive programområde och med de tidplaner som där givits.

Alternativ teknik för utförande av förvarsanläggningar och barriärer kommer främst att studeras från slutet av 90-talet och fram till att konstruktionsarbetet skall påbörjas.

Anpassning av plats och tekniskt barriärsystem till varandra liksom en systematisk optimering av förvaret kommer ej att påbörjas förrän i slutet av 1990-talet.

4.5 FORSKNINGSPROGRAM 1990-1995

Studierna av djuphålsdeponering och dess säkerhetsaspekter kommer att fullföljas under 1990 med en jämförande analys med referenskonceptet KBS-3.

En principstudie av en alternativ utformning, innebärande att långa deponeringstunnlar dras ut under Östersjön, kommer att göras ev knuten till den informationsbas som erhålles vid det underjordiska berglaboratoriet. Ett tillräckligt bedömningsunderlag förväntas dock inte föreligga förrän ca 1992/93. Vissa stödande insatser rörande förundersökningar av vattentäckta områden kommer att genomföras. Se kapitel 2.

Till 1995 måste alternativ av typen

- en eller flera kapslar i varje deponeringshål,
- deponering i långa borrhåll mellan transporttunnlar,
- deponering i tunnelcentrum eller borrhåll,

ha granskats till sådan nivå att egenskaper av betydelse för de detaljerade geostudierna har definierats.

5 TEKNISKA BARRIÄRER

5.1 AVFALLSFORMER

5.1.1 Mål för FoU-verksamheten

Beständigheten av utbränt bränsle i grundvatten studeras för att till 1995 få den kunskap om mekanismerna och kinetiken som krävs för att kunna modellera upplösningen av UO_2 . Denna modell skall kunna användas som källterm för säkerhetsanalys. Bättre kunskap om hur bränsle löses upp i grundvatten gör det möjligt att optimera kapseln till utformning och material. Den ger också underlag till optimering av närområdet till kapseln och är av stor betydelse för att bestämma kraven på bergets kvalitet.

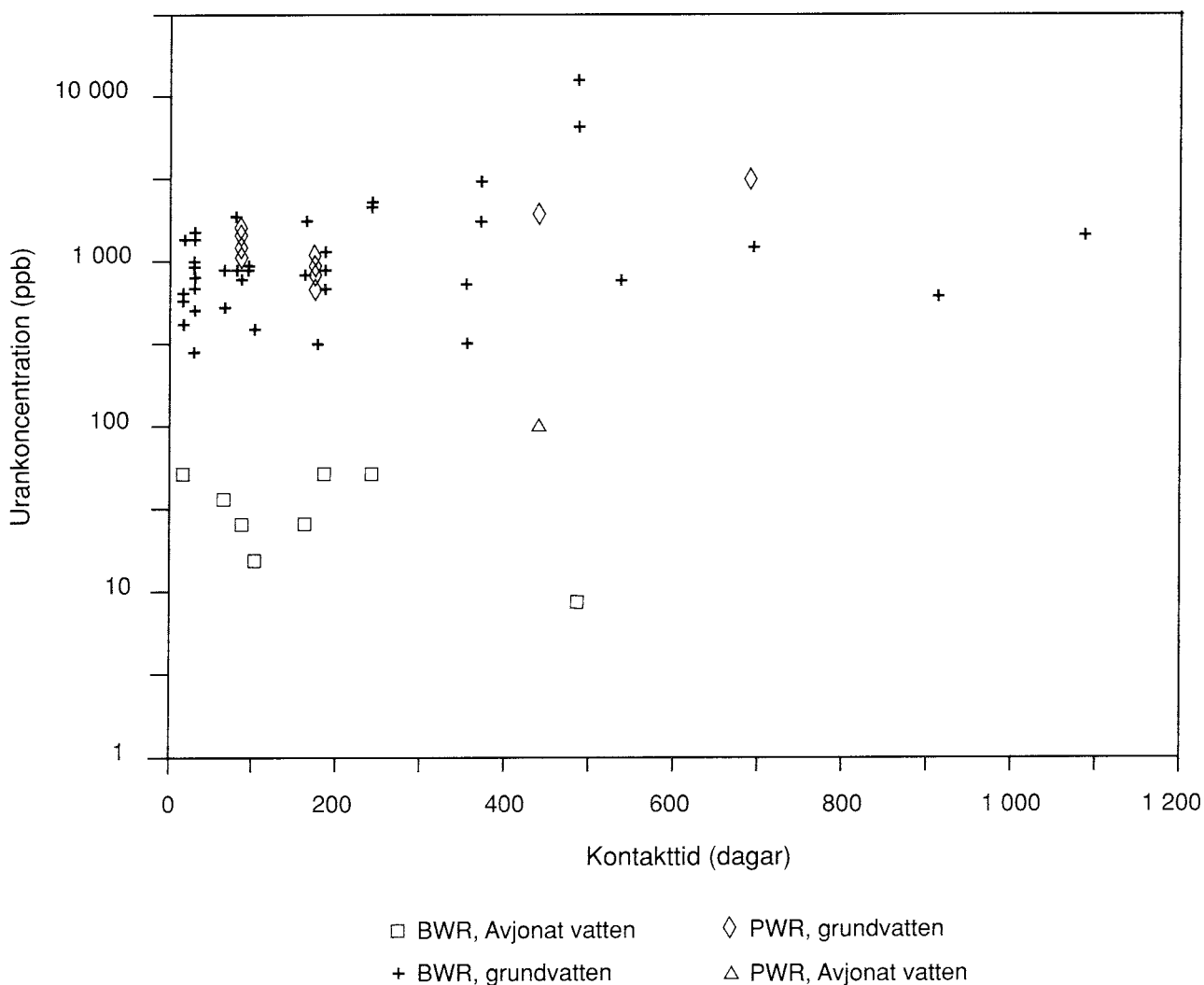
5.1.2 Nuvarande kunskapsläge

Direktdeponering av använt kärnbränsle blev aktuellt i slutet av 1970-talet /5-1, 2/. Sedan dess har de olika

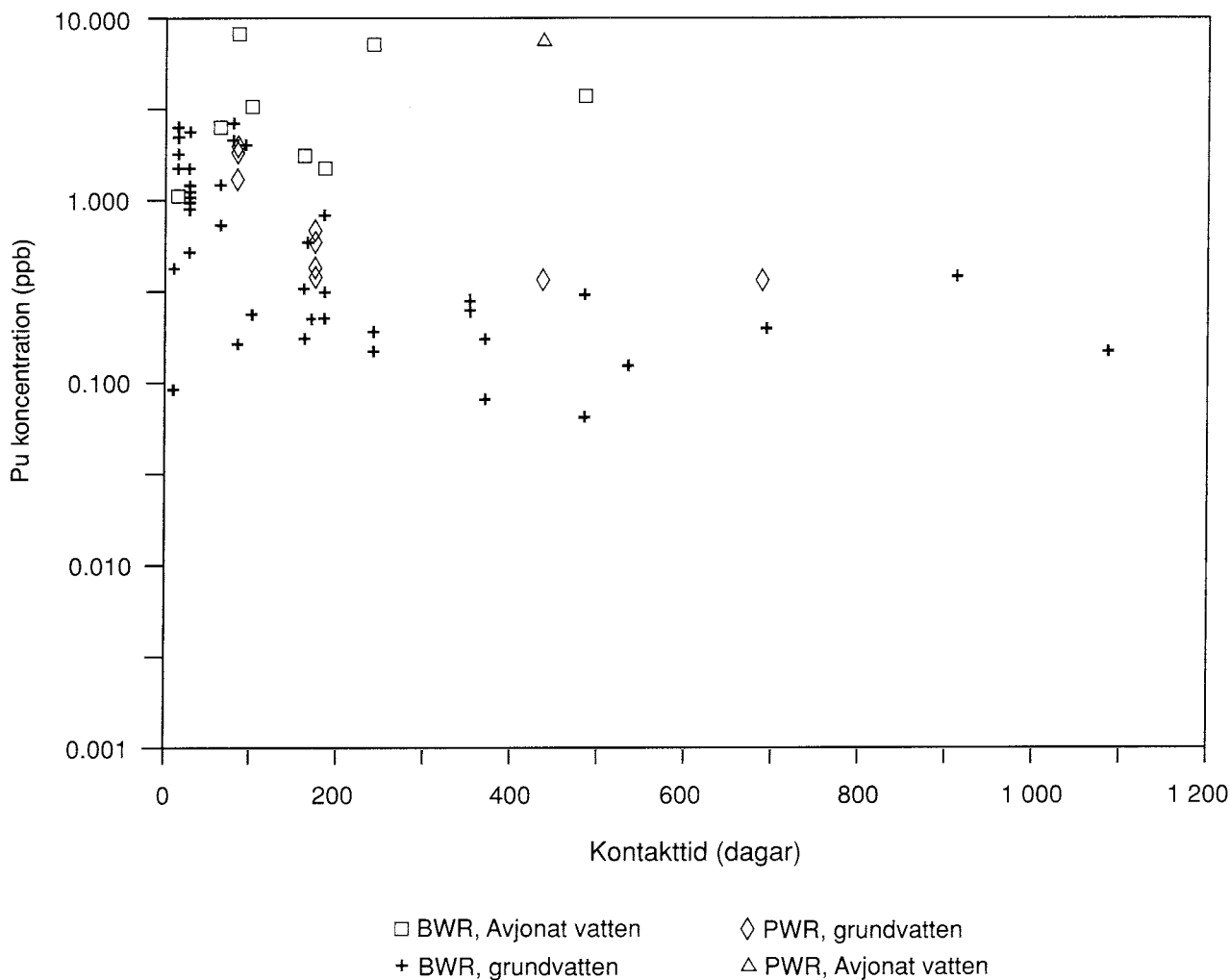
aspekterna av direktdeponering undersökts i varierande detalj i flera länder. Sverige, Kanada, USA och Förbundsrepubliken Tyskland har studerat detta område i nästan tio år. Kunskapsläget i världen för använt bränsle som avfallsform har nyligen sammanfattats av Johnson och Shoesmith /5-3/.

Det nuvarande svenska programmet för studier av bränsle började 1982. Det var då baserat på en preliminär undersökning, som gjordes 1977 som en del av KBS-2 arbetet. Läget för SKBs forskning inom området är sammanfattad i en teknisk rapport /5-4/. Därför ges endast en kortfattad beskrivning i detta kapitel.

Totalt har endast ett trettiotal vetenskapliga rapporter publicerats, som behandlar använt bränsles beständighet i vatten. Många variabler påverkar beständigheten i vatten, som t ex bränslets bestrålningshistoria, grundvattenkemi, redoxpotential (E_h) och temperatur. Det är därför inte förvånande att man ännu inte har en



Figur 5-1 Urankoncentrationen i centrifugatet för högutbränt BWR- och PWR-bränsle.



Figur 5-2 Plutoniumkoncentrationen i centrifugatet för högutbränt BWR- och PWR-bränsle.

helt entydig bild av mekanismerna för bränsleupplösning. Trots begränsade data är emellertid en del sidor av upplösningmekanismerna relativt väl kända och det är nu möjligt att ge en beskrivning av inverkan av de väsentligaste variablerna på kinetiken för upplösningen av bränsle.

INVERKAN AV BESTRÅLNINGS-HISTORIEN

Gapinventariet

Bränslets bestrålningshistoria har stor betydelse för frigörelsen av flyktiga fissionsprodukter, för bränslets mikrostruktur och för utskiljningen av fissionsprodukter till korngränserna. Cesium och jod tillsammans med fissionsgaserna xenon och krypton frigörs från bränslematrisen till tomrum inuti bränslestaven. Mängderna som frigörs beror bland annat på bränslets temperatur under drift.

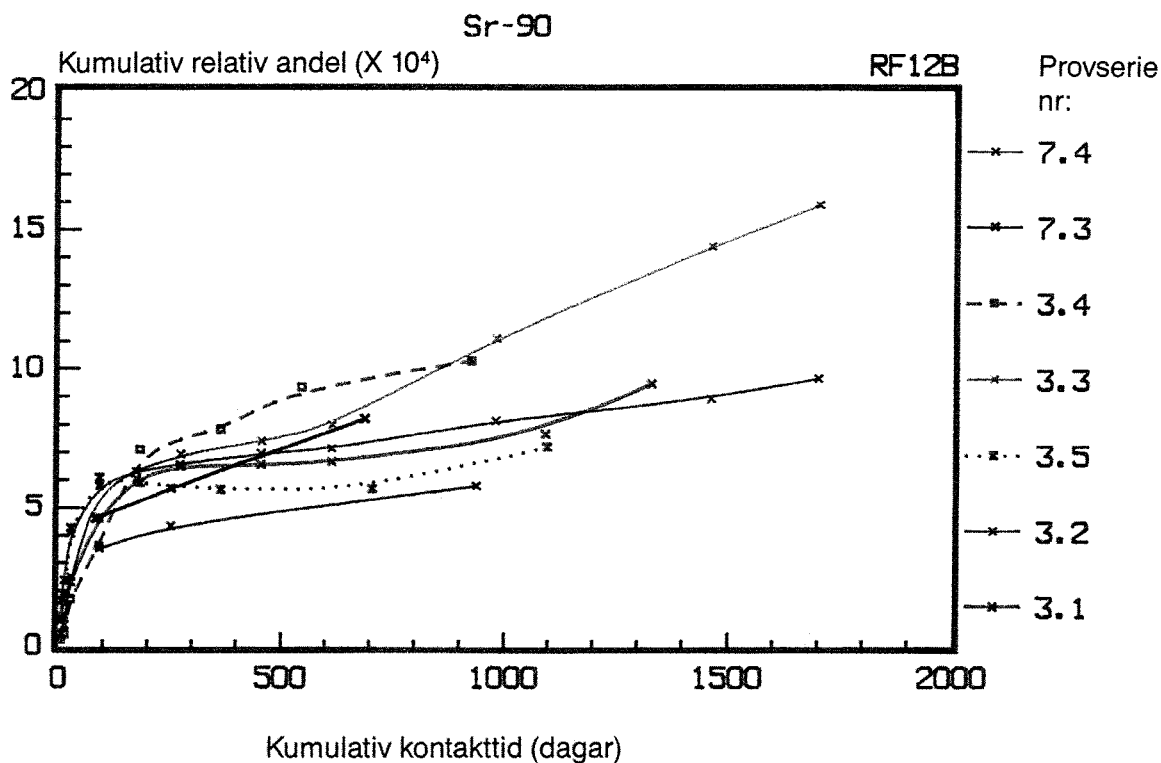
Korngränser

Vissa fissionsprodukter, t.ex. cesium, tycks fortsätta att lakas selektivt även efter lång exponering för grundvatten. Detta är inte förvånande eftersom det första steget i frigörelsen från matrisen är anrikning i korngränserna. Denna selektiva lakning är troligen begränsad till atomer som inte passar in i UO_2 matrisen. Det finns inga tecken på att kompatibla ämnen som lantanider och aktinider skulle lakas selektivt.

Man vet mycket lite om hur stor andel av fissionsprodukterna som finns i korngränserna. Ännu pågående studier tyder på att flera tiotals procent av inventariet av 4d-metaller (Mo, Tc, Ru, Rh, Pd) kan ligga som separata faser i korngränserna.

GRUNDVATTENSAMMANSÄTTNING

Det är väl känt att karbonat bildar starka uranylkomplex. Detta återspeglas i en betydligt högre uranlöslighet i karbonathaltigt vatten jämfört med destillerat vatten, se Figur 5-1. Frigörelsen av fissionsprodukter



Figur 5-3 Kumulativ frigjord andel strontium vid lakning av BWR- och PWR-bränsle.

tycks inte påverkas på samma sätt av dessa förändringar i vattenkemin, se Figur 5-3.

De uppmätta koncentrationerna av uran stämmer väl överens med beräkningar baserade på tillgängliga termodynamiska data. Också för plutonium är det en hygglig överensstämmelse. Ytterligare forskning kommer dock att krävas för att föra upp kunskaperna om övriga aktinider till samma nivå som för uran.

Termodynamiska data visar att höga kloridhalter i vattnet inte i någon större grad skall påverka upplösningen av UO_2 . Detta bekräftas också av undersökningar utförda i Kanada. Vid 25 °C var upplösningen av cesium, strontium och teknetium i stort sett densamma i 1 M klorid som i kloridfattigt karbonathaltigt vatten. För temperaturer över 150 °C kan emellertid en avsevärda ökning i upplösningshastigheten rapporterats. Orsaken till denna ökning i saltlösningar vid hög temperatur är okänd. I destillerat vatten och i karbonathaltigt vatten är ökningen endast måttlig.

REDOXPOTENTIAL

Redoxförhållandena vid bränslets yta har mycket stor inverkan på mekanismerna för bränsleupplösningen. Under reducerande förhållanden är UO_2 stabil. Upplösningen av bränslet kan beskrivas med jämviktsprocesser. Vid högre redoxpotentialer kan en oxidativ upplösning ske. Detta är ett dynamiskt förlopp relaterat till faktorer som morfologi. Den är också kopplad till radiolys från bränslet, som kan ge upphov till lokala oxiderande förhållanden på bränslets yta.

Elektrokemiska undersökningar som gjorts i Kanada har klart visat betydelsen av syrehalt och redoxpo-

tential vid upplösning av UO_2 . Hastigheten för upplösning av UO_2 tycks vara proportionell mot syrets partialtryck. Även för utbränt bränsle minskar upplösningen avsevärt när syrekoncentrationen minskar.

Alfaradiolys av ett tunt vattenskikt närmast bränsleytan kan ge lokalt oxiderande förhållanden även om närområdet är reducerande. Att alfaradiolys ger oxiderande förhållanden har visats i Kanada genom elektrokemiska undersökningar av obestrålad UO_2 . De experiment som utförts med bestrålat bränsle har inte bekräftat dessa observationer. Det är dock rimligt att anta att redoxpotentialen vid bränsleytan är högre än i närområdet i övrigt och fjärrområdet. Detta kan betyda att UO_2 inte är den stabila uranoxiden och att fissionsprodukterna och aktiniderna kan komma att frigöras genom att bränslematrisen omvandlas oxidativt.

Uran- och aktinidkoncentrationerna har visat sig vara konstanta och oberoende av kontakttid under såväl oxiderande som reducerande förhållanden. Se t ex Figurerna 5-1 och 5-2. Detta talar för att upplösningen av dessa ämnen är löslighetsbegränsad och inte styrd av hastigheten för omvandling av matrisen.

För fissionsprodukterna är tolkningen av resultaten mer osäker. Strontium anses allmänt vara löst i matrisen. Det visar sig emellertid att lakningen av strontium från bränslet är oberoende av uranmättnad. Den beror i första hand av den totala tid bränsleprovet varit i kontakt med vatten, se Figur 5-3. Figur 5-3 visar också att lakningen av strontium kan vara olika för olika prov. De två kurvscharorna i Figur 5-3 representerar två olika delar av en BWR stav. Resultaten förefaller därför vara en kombination av lakning på grund av oxidation av UO_2 matrisen och möjligen också ett bidrag från selektiv lakning av korngränser.

TEMPERATUR

Bränsleupplösning under oxiderande förhållanden har studerats i temperaturintervallet 25 °C till 200 °C. De data som finns tillgängliga tyder på ett relativt litet temperaturberoende, motsvarande en ökning på ca 10 gånger mellan 25 °C och 150 °C. För reducerande förhållanden finns det inga tillförlitliga data.

ANDRA KOMPONENTER I NÄROMRÅDET

En preliminär undersökning har gjorts av inverkan av bentonit på upplösningen av bränsle under oxiderande förhållanden /5-5/. Resultaten visar att koncentrationerna i lösning av fissionsprodukter och aktinider sjunker markant på grund av sorption på bentoniten. Koncentrationen av uran förblir opåverkad. Detta antas bero på att uran bildar anjoniska komplex med karbonat. Dessa anjoner sorberas inte lika effektivt av bentoniten. Närvaron av bentonit ledde inte till någon ökning i upplösningshastigheten.

MODELLER

I KBS-3 användes en transportmodell med mycket enkla antaganden för bränsleupplösningen. Oxiderande förhållanden antogs råda vid bränsleytan. Ämnen med högre löslighet än uran förutsattes begränsas av matrisupplösningen. Frigörelsen av övriga ämnen förutsattes vara löslighetsbegränsad.

En sådan modell är egentligen endast strikt tillämpbar under förhållanden då bränsleytan oxiderats till högst $UO_{2,25}$. Om ytoxideringen nått $UO_{2,33}$ är upplösningen oxidativ och modellen måste baseras på upplösningsskinetik.

En modell för upplösning av UO_2 baserad på bränsleytans löslighet har utvecklats vid AECL /5-6/. Denna modell kopplar en konvektions/diffusionsmodell för upplöst uran med ett gränsvillkor definierat av uranlösligheten vid bränsleytan. För att en sådan modell skall kunna anpassas till oxiderande förhållanden måste gränsvillkoren vid bränsleytan definieras så att hänsyn tas till kinetiken för oxidativ upplösning. Upplösningssprocessen kommer nu att bli irreversibel och upplösta U(VI) specier kan komma att fällas ut som sekundära faser.

5.1.3 Viktigare remissynpunkter från FoU-program 86

Statens kärnbränslenämnd tillstyrkte i huvudsak SKBs planering av det fortsatta arbetet, men ifrågasatte om tidsplanen kan hållas. Studier av använt bränsle har hög prioritet för SKB, men insatserna begränsas i någon mån av i Sverige tillgängliga resurser vad avser personal och utrustning.

En viss omplanering har också skett utifrån nämndens rekommendation att SKB i sitt program tar större hänsyn till buffertmaterialets inverkan på bränslekorrosionen. Detta har lett till att undersökningar av bränslekorrosion i närvaro av dels en utspädd bentonitsuspension, dels högkompakterad bentonit, genomförts. Den första av dessa undersökningar är av-

slutad och rapporterad /5-5/. För den andra pågår ännu utvärderingen. Som var förutsett orsakade experimentens komplexitet svårigheter med analyserna. Dessa har nu i stort sett lösts och en mer komplett första redovisning kan komma att bli färdig under 1989. En preliminär redovisning gjordes under 1988 /5-7/.

Omläggningen av programmet har fått till följd att en del andra planerade aktiviteter fått vissa förseningar. Detta äventyrar dock inte tidplanerna i stort även om de fortfarande är snäva.

5.1.4 Forskningsprogram 1990-1995

De huvudfaktorer, som påverkar använt bränsles beteende i grundvatten är:

- 1) bestrålningshistorien, som påverkar mikrostrukturen hos bränslet och har stor betydelse för utskiljningen av radionuklider till sprickor och korngränser,
- 2) redoxpotentialen och inverkan av alfaradiolysen på redoxförhållandena närmast bränsleytan,
- 3) vattenkemin, speciellt i närvaro av andra komponenter i närområdet,
- 4) aktinidernas termodynamik.

Inom dessa områden finns fortfarande stora kunskapsluckor. De väsentligaste ligger inom följande områden:

- fördelningen av fissionsprodukter och aktinider på korngränser och matris i bränslet. Ett eventuellt korngränsinventarium kan frigöras snabbare och med delvis andra mekanismer än matrisbundna radionuklider,
- redoxförhållandena på bränsleytan (inverkan av radiolys). Detta har betydelse för om modell för löslighetsbegränsad upplösning eller en modell för kinetiskt styrd upplösning skall tillämpas,
- termodynamiska data för vissa element, som t ex Tc, Pu och Np. Detta gäller såväl specier i lösning, som eventuella löslighetsbegränsade fasta faser.

Under föregående treårsperiod har tyngdpunkten i arbetet legat på studier av korrosion av använt bränsle i grundvatten för att skapa en databas som är statistiskt tillförlitlig. Denna typ av undersökningar har nu minskats avsevärt. För närvarande pågår endast några få försöksserier med BWR bränsle och ett tiotal serier med PWR bränsle. Under den kommande perioden kommer tonvikten att läggas på andra slags experiment där mer specifika frågeställningar studeras. Dessa undersökningar kommer att som tidigare göras på BWR och PWR bränsle. Under periodens senare del kan det också bli aktuellt att vidga undersökningarna till att omfatta också gadoliniumdotat bränsle.

BRÄNSLETS MIKROSTRUKTUR

Frigörelsen av fissionsprodukter och aktinider ur bränslet sker från tre olika källor. Under drift har bland annat Cs och I frigjorts ur bränslematrisen och är lätt tillgängligt för lakning i gapet mellan kapsling och

bränsle och i sprickor i bränslet. Andra fissionsprodukter, som till exempel Pd, Tc, Ru, Rh och Mo kan ha bildat separata faser i bränslet. På detta sätt segregerat material kan frigöras snabbare och med andra mekanismer än de radionuklider, som är inneslutna i UO_2 matrisen. Det är därför viktigt att det använda bränslet karakteriseras med avseende på fördelningen av fissionsprodukter och aktinider. Denna information har stor betydelse för arbetet med utveckling av prediktiva modeller.

Erfarenheterna från föregående period har visat att detta arbete är komplicerat och tidsödande. Erfarenheterna från JSS-projektet har visat att analys av den fasta fasen är nödvändig för att få den kunskap om kinetiken och mekanismerna för korrosion som krävs för att modellera förloppet. Området har hög prioritet och insatserna kommer att ökas jämfört med föregående period. Emellertid är resurserna inom landet begränsade. Nära samarbete med utländska forskare och institutioner kommer därför troligen att bli nödvändigt. Liksom tidigare kommer tekniken att i första hand vara optisk mikroskopi, SEM, STEM/TEM, mikrosondanalys och Auger spektroskopi. Undersökningarna kommer att göras dels på befintligt PWR och BWR bränsle, men kommer att kompletteras med undersökningar av en segmentstav som utsatts för en kontrollerad effekthöjning i R2 reaktorn. Effekthöjningen ger en annorlunda temperaturfördelning än vad som gäller i en kommersiell reaktor och resulterar i omfördelning av i bränslet rörliga fissionsprodukter.

RADIOLYS

De experimentella data som finns tillgängliga visar att radikaler som bildas under radiolys av vatten orsakar oxidation av UO_2 . De strålningsfält som använts i experimenten har visserligen varit mycket högre än vad som kan förväntas nära bränsleytan i förvaringsmiljö. Det är trots detta rimligt att anta att förhållandena på bränsleytan är oxiderande även om storleken på den radiolytiska effekten inte är känd. Detta innebär att frigörelsen av radionuklider ur bränslet kommer att ske genom oxidativ upplösning.

Under föregående period har undersökningar av radiolytisk oxidation i gammalfält studerats. Den del av dessa experiment, som utförs i Sverige kommer att avslutas inom det närmaste året. En eventuell fortsättning kommer att genomföras inom ramen för ett nu pågående samarbetsprojekt med AECL, Kanada. Under de kommande tre åren kommer tonvikten att läggas på experimentella undersökningar av effekterna av alfaradiolys, speciellt i syrefria system.

De experiment som utförts under oxiderande förhållande, genom att laklösningen står i kontakt med en luftvolym, ger säkert en övre gräns för oxidationshastigheten. Den faktiska hastigheten i ett syrefritt system är däremot inte känd. Under perioden kommer oxidationen genom alfaradiolys att undersökas såväl på modellsystem som på system där använt bränsle ingår.

KORROSION AV HÖGAKTIVT BRÄNSLE

Korrosionsstudierna på PWR och BWR bränsle kommer att fortsätta under de närmaste åren. I motsats till

den tidigare perioden kommer emellertid färre, men mer specifika experiment att utföras. Även analysinsatserna kommer att bli mer omfattande för varje experiment. Liksom tidigare är de fenomen som skall speciellt studeras:

- löslighets- och mätnadseffekter,
- typen av korrosion på bränslet,
- kolloidbildning,
- oxiderande/reducerande förhållanden.

En del av dessa fenomen har redan diskuterats i mer detalj under andra avsnitt i texten och tas därför inte upp under denna rubrik.

Löslighets- och mätnadseffekter, aktiniders termodynamik

Generella data för aktinid- och fissionsproduktlösligheter i grundvatten kommer att bestämmas inom ramen för SKBs kemiprogram, se kapitel 7. Under den gångna perioden har urandatabasen för hydroxider och karbonater uppdaterats och validerats /5-8/. För närvarande pågår motsvarande arbete för fosfater och silikater. Detta arbete beräknas kunna avslutas inom de närmaste tre åren. Utöver arbetet med urandata har också en uppdatering av databaserna för teknetium och plutonium påbörjats. I båda fallen innebär uppdateringen såväl kritisk granskning av litteraturdata som experimentell bestämning av data.

En jämförelse mellan experimentella jämviktskoncentrationer för uran och beräknade lösligheter för tänkbara löslighetsbegränsande uran(VI) faser, visar på en diskrepans på en faktor 10 till 50 för oxiderande förhållanden. Avvikelsen är inte förvånande med tanke på att ingen löslighetsbegränsande sekundärfas ännu kunnat säkert identifierats experimentellt. Kinetiken för upplösningen av UO_2 och utfällningen av sekundärfasen är också otillräckligt känd. Arbetet med dessa problem har påbörjats och kommer att fortsätta under de närmaste åren. Detta arbete innebär också att så långt möjligt bestämma oxidationstillstånd och specie för radionuklider i lösning.

Vattenkemi

Sedan KBS-3 har platsundersökningarna visat att relativt höga kloridhalter kan förekomma, i synnerhet i kustnära områden. Kloridhalter på över 10.000 ppm har uppmätts. Dessa halter är inte så höga att man kan förvänta sig att de på ett mer avgörande sätt påverkar lösningskemin för aktinider och fissionsprodukter. Några experiment avses dock genomföras för att bekräfta detta.

Även sammansättningen på vatten som står i kontakt med bentonit påverkas starkt. En viss ökning i bikarbonatkoncentrationen har uppmätts för Mx 80. För kalciumbentoniter som konditionerats med soda kan ökningen i bikarbonathalt bli betydande. Det är inte helt klart ifall denna påverkan på vattensammansättningen är bestående eller enbart övergående, eftersom man kan vänta sig att detta överskottskarbonat kommer att lakas ut ur bentoniten. Inverkan av karbonater på upplösningen av UO_2 är väl känd, men även i detta fall kommer ett antal specifika undersökningar att göras.

Utöver karbonathalten ökar även sulfathalten till några tusen ppm vid kontakt med bentonit. Sulfathalter i detta koncentrationsområde förväntas inte påverka lösningskemin för de mer betydande aktiniderna och fissionsprodukterna. Denna ökning kan dessutom vara transient. Några experiment med lakning i syntetiskt bentonitporvatten avses dock genomföras för att bekräfta detta. Experiment i syntetiskt bentonitporvatten kommer också att vara ett steg i studierna av de mer komplexa, realistiska förvarsförhållandena.

Kolloider

Under föregående period har kolloid- och partikel-fraktionerna karakteriserats enbart med hjälp av filtrering genom membranfilter. Det ger en uppskattning av mängden partikulärt/kolloidalt material, men är en alltför trubbig metod för att ge en god uppfattning om storleksfördelningen. Försök med mer sofistikerade metoder har gjorts, men resultaten har inte varit uppmantrande. Utvecklingen av metoder och teknik pågår och kommer att bevakas och ytterligare insatser kan bli aktuella under den kommande perioden.

MODELLUTVECKLING

Syftet med modellutvecklingen är att ta fram en prediktiv modell för korrosion av använt bränsle under långa tidsperioder. En sådan prediktion är bara meningsfull om upplösningsmekanismerna i det korta och i det långa tidsperspektivet är kända och kvantifierade. Arbetet fortgår efter samma linjer, som angavs i det tidigare forskningsprogrammet. Huvudmålet för den kommande perioden är att ta fram en mer realistisk modell för bränsleupplösning än KBS-3 modellen för att använda i säkerhetsanalysen för SKB 91.

Arbetet utgår ifrån att bränsleupplösningen kan vara oxidativ och styrd av radiolys. Detta innebär att en kinetisk modell måste användas, åtminstone under ett tidigare skede av bränsleupplösningen. I ett längre perspektiv, när alfaaktiviteten avklingat, kan bränsleupplösningen beskrivas med hjälp av en löslighetsbegränsningsmodell. Under perioden kommer därför dessa båda modeller att utvecklas parallellt.

5.2 KAPSEL

5.2.1 Mål för FoU-verksamheten

Målet för studierna av kapselmateriäl är att till omkring 1995 ha tillräcklig kunskap om såväl koppar som alternativa material för att kunna slutgiltigt välja kapselmateriäl. Detta gäller såväl korrosionsbeständighet som övriga materialegenskaper av betydelse för kapselkonstruktion och för kapselns mekaniska beständighet.

5.2.2 Nuvarande kunskapsläge

I samtliga program för slutförvaring av högaktivt avfall förutsätts avfallet vara inkapslat i en tät behållare vid deponeringen. I de flesta länder siktar man på en absolut inneslutning, dvs livslängd på kapseln, på ca 1000 år. Sverige och några andra länder har dessutom

som alternativ eller som huvudalternativ långtidsinneslutning (ca 100.000 år) i kapsel.

De utländska forskningsprogram med förvarsgeologi, som är mest relevanta för svenska förhållanden är i första hand Kanada, Schweiz, Finland och EG.

Kanada har valt titan som referensmaterial och koppar som ett alternativmaterial. För båda materialen är inriktningen en relativt tunnväggig kapsel med livslängd i storleksordningen 1000 år. Syftet med forskningen är att få en förståelse för de tänkbara korrosionsprocesserna genom att använda elektrokemisk teknik för att studera mekanismerna och långtidsexperiment för bekräftelse. På grund av den korta kapsellivslängden i förening med tunnväggiga material är forskningen till stor del inriktad på korrosion under oxiderande förhållanden. Dessutom har det kanadensiska grundvattnet i tänkta förvarsområden mycket hög kloridhalt, ca 1 mol/l. Titan och titanlegeringar är mycket korrosionsbeständiga, i synnerhet i kloridhaltiga vatten. Allmätkorrosionen är mycket liten, men materialen har visat sig ha en viss känslighet för spaltkorrosion. Forskningen inriktas på undersökningar av förhållandena för spalter och utbredningshastigheten av spalter. För koppar är forskningen i hög grad inriktad på undersökningar av korrosionskinetiken vid allmätkorrosion under oxiderande förhållanden, men kunskapsluckorna angående gropfrätning vid sulfidkorrosion har också identifierats.

I det schweiziska programmet är huvudalternativet en tjockväggig stål-kapsel med kopparkapsel som andra alternativ. Stål-kapseln skall ha en livslängd på minst 1000 år. Forskningen under de senaste åren har i första hand varit inriktad på väteproducerande korrosion och spänningsskorrosion.

Det finska programmet är mycket likt det svenska och huvudalternativ är en kopparkapsel av ungefär samma typ som den svenska kapseln.

Som påpekades i FoU-program 86 bedrivs det forskningsarbete, som pågår på koppar i mer långsiktiga projekt. Huvuddelen av arbetet är ännu inte avslutat, men beräknas bli det under den kommande perioden.

För kopparkorrosion är insatserna koncentrerade till undersökningar av gropfrätning under reducerande förhållanden. Etapp 1 är avslutat och en ny etapp kommer att påbörjas under senare delen av 1989. Ännu har inget framkommit, som ändrar slutsatserna från KBS-3, dvs att det mest sannolika värdet på gropfrätningfaktorn är 5. Utvärderingen av den första kanton, som bärgats från regalskeppet Kronan har avslutats och publicerats /5-9/. Bronset, som är mycket kopparrikt (96,3% mot normalt ca 90%), visade mycket liten korrosion, motsvarande mindre än 10 mm på 100.000 år.

Metodutvecklingen av HIP teknik för koppar har avslutats under perioden. Resultaten visar att med inert hantering av kopparpulvret är det möjligt att åstadkomma ett sintrat material med duktilitet och mekaniska egenskaper som är jämförbara med egenskaperna hos vanligt kopparmateriäl. Spänningsskorrosionstester visade att det HIPade materialet inte hade en högre känslighet för spänningsskorrosion än OFHC koppar /5—10/. Utvecklingen av svetsteknik pågår inom ramen för ett EUREKA projekt. Under fö-

regående period har definitionsfasen avslutats. Fas två har startats under 1989.

En första etapp av undersökningarna av koppars krypegenskaper har avslutats /5-11/. Undersökningen har visat på avsevärda skillnader i krypegenskaper mellan svetsen, den värmepåverkade zonen och modermaterialet. Dessutom visar ännu preliminära resultat på att krypduktiliteten hos koppar är relativt låg. Ytterligare forskning krävs därför innan krypegenskaperna hos koppar under förvarförhållanden är klarlagda.

För stål som kapselmateriale har insatserna koncentrerats till undersökningar av gropfrätning under den aeroba perioden i förvaret. En statistisk undersökning av gropfrätningförloppet har också genomförts /5-12/. Med undantag för några långtidsprover är undersökningarna av gropfrätning avslutade. Resultaten har också tillämpats i en preliminär utvärdering av livslängden av en stål kapsel i ett KBS-3 förvar. Med 100 mm vägg tjocklek kan en livslängd på ca 1000 år uppnås.

För titan är forskningsaktiviteterna avslutade. Långtidsexponeringar på upp till 6 år med titan i kontakt med bentonit har utvärderats. Dessa prover visar upp en begynnande kristallisering av oxidskiktet och i några fall har en ökning i tillväxttakten (korrosions-hastigheten) observerats /5-13/.

I KBS-3 redovisades två alternativa utformningar av en kopparkapsel med minst 10 cm tjocklek. Dessa var principiellt olika beträffande teknik för förslutning och kompaktet. Den svetsade och blyfyllda kapseln hade en blyfyllning med kvarstående porositet motsvarande högst 2% av invändiga volymen. I bruksskedet kommer kopparkapseln att krypdeformeras under det yttre trycket. Forskningen har under senare tid ägnats åt koppars egenskaper vid sådan krypdeformation (se ovan). En beskrivning av krypningen i svetsad kopparkapsel med beaktande av realistiska låga spänningar och möjliga brottmekanismer finns emellertid ännu inte. Det finns inte heller underlag för bedömning av den pressade kapselns motsvarande beteende vid scenarier som beskriver rörelser i berggrunden, som direkt påverkar kapseln.

Modellutveckling för mekanisk samverkan berg/buffert/kapsel pågår, se avsnitt 5.3.3.8. Med denna modell kan deformationsförloppet i kopparn beräknas om grund för dimensionering eller scenario, t ex rörelse i berg med deponeringshål på grund av temperatureffekter, glaciation eller dylikt, definierats. Då brottmekanismen klarlagts finns ett underlag för dimensionering eller konsekvensbeskrivning som i sin tur ger underlag för säkerhetsanalysen. Det är naturligtvis inte meningsfullt att pröva andra fyllningsmaterial i kapseln som ger större porositet utan denna dimensioneringsgrund.

En stål kapsel kan dimensioneras med vald säkerhetsfaktor mot brott. En beskrivning av trolig brottmekanism vid överbelastning och/eller korrosion finns ännu inte. En kopparkapsel som är invändigt stödd av en stål kapsel är ett intressant alternativ för fortsatta studier.

Vid utformning av svetsade kapslar skall särskilt beaktas möjligheter till kvalitetssäkring avseende kap-

sels täthet och eventuella materialförändringar i området kring svetsen. FoU-programmet skall innefatta sådana analyser av sammanhangen mellan kvalitet och utformning.

5.2.3 Viktigare remisspunkter från FoU-program 86

Statens kärnbränslenämnd framhöll att kapslar som består av enbart korroderande material inte behöve ingå i SKBs program. SKB anser att det inte finns anledning att avfärda stål som ett kapselmateriale enbart på grund av kortare förväntad livslängd. Endast om underlag och tillgängliga data inte entydigt styrker att den önskade kapsellivslängden kan uppnås, eller om kortare kapsellivslängd ger oacceptabla konsekvenser kan kapselmaterialet avfärdas. Det bör framhållas att koppar fortfarande är huvudalternativet och är högst prioriterat. I det fortsatta programmet ses stål i första hand som ett alternativ till bly som bärande komponent i kapseln (se nedan). I SKB 91 kommer emellertid även en stål kapsel att studeras, för att så allsidigt som möjligt belysa konsekvenserna av tidiga kapselgenombrott.

Den sensationella observationen att koppar skulle kunna korrodera under vätgasutveckling /5-14/ har kontrollerats av två av varandra oberoende undersökningar /5-15, 16/. I ingendera fallet har vätgas kunnat påvisas, trots att de utrustningar som använts kunnat detektera en produktionshastighet för vätgas, som varit endast en tusendel av den Hultquist rapporterat. Något förklaring, på vetenskaplig grund, till Hultquists observationer har inte kunnat göras.

Givetvis får det förutsättas att inkapslingsprocessen inte kan ske med absolut felfrihet. SKB har för närvarande inte tagit ställning till om defekta kapslar skall repareras eller helt enkelt inkapslas i ytterligare en kapsel. SKB avser att ta upp denna fråga mer i detalj i samband med utformningen av inkapslingsstationen.

SKB delar nämndens och remissinstansernas synpunkt att sk fördröjt brott hos keramer inte enbart kan ses som en materialegenskap utan är starkt beroende av tillverkningsteknologin. Det är dessutom ett statistiskt betingat fenomen, och observationer på prov från småskalig tillverkning kan i viss utsträckning vara irrelevanta för bedömningen av sannolikheten för fördröjt brott på en fullstor kapsel. Mot den bakgrunden har TAC i Kanada dragit slutsatsen att undersökningar av keramers beständighet i vatten bara har relevans om de kopplas till en fullskaleproduktion av kapslar av sådana material /5-17/. På samma grund anser SKB keramiska kapslar inte heller vara intressanta för svenska förhållanden.

5.2.4 Forskningsprogram 1990-1995

De mest angelägna forskningsområdena för perioden är följande:

- korrosionsbedömning för potentiella kapselmateriale,
- utprovning/utveckling av teknik för oförstörande provning,
- definiering av brottmekanismer och fördelning i tiden för kapselbrott.

KORROSIONSTUDIER

För koppar är pågående undersökningar inriktade på kompletterande studier av gropfrätning hos koppar under reducerande förhållanden. Dessa undersökningar kombineras med ytterligare utvärdering av arkeologiskt material.

Som diskuterades ovan är undersökningarna av gropfrätning på stål i det närmaste avslutade och endast några långtidsexponeringar kommer att utvärderas under perioden. Utöver dessa pågår studier av inverkan av vätgasproducerande korrosion under reducerande förhållanden. Dessa undersökningar är indelade i tre delar. (1) Elektrokemisk mätning av vätgasproduktionens inverkan på reaktionskinetiken. (2) Undersökning av korrosionsproduktlagrets egenskaper. (3) Långtidsprovning (upp till två år) av korrosionshastigheten under vätgasövertryck. Dessa undersökningar har relevans både för en ren stålkapsel och för en kopparkapsel, invändigt stödd av stål (se nedan).

Undersökningar av tillväxten av passivfilmen på titan har avslutats under perioden. Resultaten visar på vissa förändringar, som kan ha betydelse för passivfilmens långtidsstabilitet. Dessa resultat måste ytterligare utvärderas innan det är möjligt att ta ställning till fortsatta studier. Liksom tidigare kommer eventuella svenska insatser att planeras så att de kompletterar de mer omfattande kanadensiska undersökningarna.

MATERIALEGENSKAPER

Krypegenskaperna hos koppar och svetsförband i koppar vid låga spänningar är ännu inte helt klarlagda. Ytterligare insatser på detta område kommer att göras under den närmaste treårsperioden.

FÖRSLUTNINGSTEKNIK

Elektronstrålesvetsning bedöms fortfarande som den metod, som har mest utvecklingspotential för kapsel-förslutning. Insatserna på detta område sker inom ramen för ett EUREKA projekt i samarbete med Welding Institute och andra utländska intressenter. Under perioden kommer dessutom insatser att göras på oförstörande provning av elektronstrålesvetsat material.

KAPSELUTFORMNING

En kapselutformning utan de krav på uppvärmning som blyfyllning och HIP-prensning enligt KBS-3 medför, innebär behov av analys av sammanhangen mellan dimensioner, yttre tryck och brottlaster samt de möjligheter till kvalitetskontroll som en självbärande kapsel erbjuder.

En stålkapsel dimensionerad enligt tillämpliga delar av svenska regler och normer för tryckkärl, får beroende på gavelutformningen en vägg tjocklek av 7 à 8 cm med yttre övertryck 15 MPa. Den kan ges ett korrosionsskydd av koppar.

Alternativa utformningar av koppar och/eller stålkapslar bearbetas med hänsyn till tillverkning, hantering och kvalitetskontroll. I samband härmed identifieras ev erforderliga prov för kvalitetskontroll av tätningar, svetsar och dylikt samt provtryckning eller annat belastningsprov.

Prov utföres med avsikt att verifiera teori för dimensionering mot brott samt noggrannhet vid kvalitetskontroll.

5.3 BUFFERT OCH ÅTERFYLNING

5.3.1 Bakgrund

Buffertmaterial i deponeringsutrymmen och återfyllningsmaterial i bergrum, tunnlar och schakt är exempel på tekniska barriärer som ingår i slutförvarssystemet. Den främsta barriärfunktionen är att begränsa grundvattenflöde. Buffertmaterial skall också utgöra en lämplig kemisk och mekanisk skyddszon för kapslar i berget. Tätningsåtgärder kan utgöras av dels tätpluggar i bergutrymmen dels tätning i bergets sprick-system i form av tätinjektering.

5.3.2 Mål för FoU-verksamheter

Målet är att kunna välja buffert- och återfyllningsmaterial vid 1990-talets mitt med angivande av egenskaper av betydelse för slutförvarsfunktionen. Alternativa metoder för deponering och slutförvarsutformning skall jämföras med beaktande av möjlig karakterisering av geologiska förhållanden.

I FoU-program 86 angavs att material och egenskaper skulle beskrivas så att val av deponeringsmetod kan grundas på:

- klarlagt sammanhang mellan olika leror, blandmaterial, förvarsmiljö och materialets egenskaper av betydelse för de tekniska barriärerna,
- utvecklad teoretisk modell för beräkningar,
- utvecklade och provade metoder att täta berg.

Vidare angavs en plan för kunskapsbreddning och modellutveckling med mål att kunna välja material ca år 1995.

Vid efterföljande remissbehandling angavs forskningsbehov rörande:

- sammanhang mellan höga temperaturer och bentonitens långtidsstabilitet,
- kemisk konditionering, inblandning av bergkross m m,
- reologi, vattenuptagning, erosionsbeständighet,
- effekter av gas,
- tätningsåtgärder i borrhål och schakt,
- modellutveckling för barriärfunktion,
- QA-program.

Inom alla dessa områden har forskning skett mer eller mindre intensivt. En redogörelse härför finns nedan och med uppdelning enligt ovan.

5.3.3 Nuvarande kunskapsläge

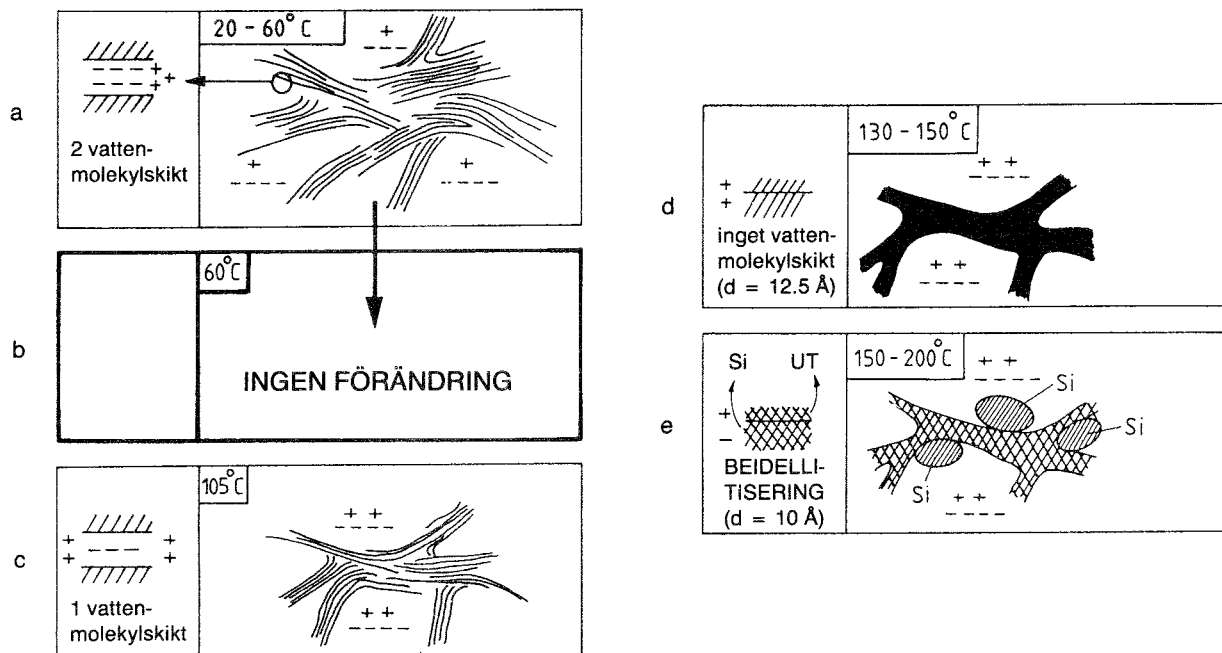
5.3.3.1 Bentonitens långtidsstabilitet

Redan i december 1983 organiserades på SKBs initiativ den andra workshopen om smektitrika lerors stabilitet under bl a inverkan av temperatur /5-18/. En allmän-

mening bland deltagarna var att smektit/illit-omvandling skedde i steg innebarande Si-frigörelse, ökad laddning genom ersättning med Al, Mg, samt intrasport av K med irreversibel fixering och bildning av det icke svällande lermineralet illit. Det rekommenderades att studera förhållanden i naturen där illitbildning skett. Den fortsatta SKB-forskningen har inriktats mot att såväl studera naturliga förhållanden, inkl. utveckling av metoder för karakterisering av lermineral, som att utföra hydrotermaltester av renare leror i laboratorier. Mineralförändringars betydelse för materialets barriäregenskaper sammanhänger med hur mineral samverkar med vatten i de för lerorna karakteristiska mikrostrukturerade arrangemang som också bestäms av bl a densitet och vattensammansättning.

De senare årens forskning har därför till stor del ägnats åt att söka förklara sammanhangen mellan lermineralens mikrostruktur och vatten i olika delar av porsystemet av betydelse för såväl de isolerande egenskaper som bestämmer betingelser för transport, som de reologiska egenskaper som har betydelse för mekanisk samverkan med kapsel och berg.

Studier av relativt ren Wyoming-bentonit med bl a autoklavtester vid temperaturer upp till ca 200 °C och undersökningar i elektronmikroskop, har lett till en mer nyanserad modell för ändring av mikrostrukturen med temperatur /5-19/ se Figur 5-4. Två nya bentonitfyndigheter med prov på material med härledbar temperaturhistoria har utnyttjats för ingående studier med resultat som stöder föreslagen modell för mikrostrukturändringar. Av särskilt stort intresse är fallet med bentonit på 500 m djup vid Hamra på Gotland. Den har visat bibehållna isolerande egenskaper utan tecken på cementering och har under minst 10 miljoner år haft 110 à 120 °C och är troligen samtida med Kinnekulle (Ordovicium).



Figur 5-4 Schematisk modell för de flakformiga lerpartiklarnas mikrostrukturella förändringar och frigörelse av kisel vid hög bentonitdensitet. Basplaneavståndet, d , är det inbördes avståndet mellan enskilda lerpartiklar.

5.3.3.2 Kemisk konditionering, inblandning av bergkross, m m

Eventuella fördelar med blandning av "getters" i buffertmaterial i avsikt att ge ökad retardation är en fråga som behandlas i närområdeskemin, se kapitel 7.

Något lämpligt termodynamiskt stabilt fyllningsmaterial att använda som buffertmaterial som nämnts i remissvaren till FoU-program 86 är ej känt. Det är sannolikt ett misstag som bygger på förväxling mellan kapsel och buffertmaterial.

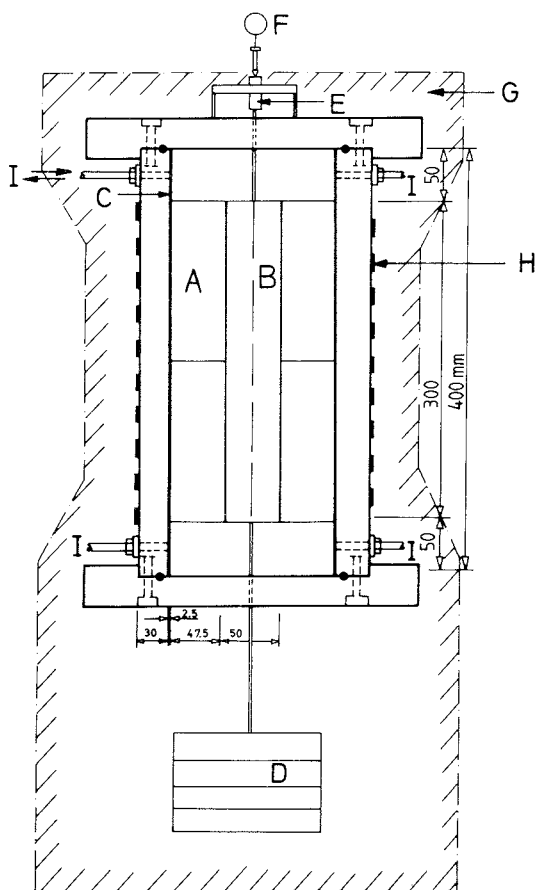
Inblandade material medför förändrade förutsättningar för bedömning av långtidseffekter.

En studie av lera/kvarts-systemet med experiment varande 70 dagar visade inte på märkbar lösning och utfällning av Si vid 115 °C temperatur och 20 MPa tryck. Litteraturen visar på fall då detta åstadkommit vid högre temperatur (270 °C). /5-20/.

En undersökning av bergkross jämfört med sand med 10 procentig inblandning av bentonit för respektive material har utförts i laboratorieskala. Skjuvdeformation har påförts packade ej vattenmättade prover och förändringar av permeabiliteten har mätts genom gasflödesmätningar i skjuvområdet. Skjuvningen medförde en förhöjd permeabilitet men den var inte högre för krossmaterial än med sand som ballast.

5.3.3.3 Reologi, vattenupptagning, erosionsbeständighet

Långtidskryp i lera under inverkan av lasten från kapsel i deponeringshål kan beskrivas i en teoretisk modell om man känner materialets reologiska egenskaper. Dessa mätes i laboratorium med god geoteknisk utrustning. För närvarande sker krypförsök med mycket små skjuvspänningar och med förhöjd temperatur.



- | | |
|----------------------------|--------------------|
| A) Bentonitblock | B) Kopparkapsel |
| C) 2,5 mm filter | D) 80 Kg blyvikter |
| E) Induktionstjningsgivare | |
| F) Mätlocka | G) Värmesulning |
| H) Värmespiral | I) Dräneringsrör |

Figur 5-5 Försöksanordning för mätning av sättning hos en simulerad kapsel i deponeringshåll.

Avsikten är att en krypmodell för Na-bentonit skall finnas framme under året.

Ett experiment i laboratorium simulerande en kapsel i deponeringshåll, se Figur 5-5, genomfördes april 1985 — dec 1986 /5-21/ och efterföljdes av ett experiment i Stripa som fortfarande pågår. I experimentet ingår förutom belastning med simulerade kapsel i deponeringshåll, uppvärmning och avsvälning för termomekaniska data. Teoretiska beräkningar av samma förlopp med en materialmodell baserad på de geotekniska mätningarna och anpassad till finita elementprogram, jämförs med experimentdata för validering.

Materialmodellen stöds av utveckling av en krypmodell som baseras på ökad förståelse av organisationsgraden för det interlamillära vattnet och arten av bindning mellan detta vatten och mineralsubstansen.

Vattenupptagningen i bentonit studerades i Stripa BMT-test med simulerade deponeringshåll i halvskala i realistiska bergförhållanden. Tillgång på vatten i berget och omfördelning av vatten i hålet beroende på värme från den simulerade kapseln var orsaken till jämn upptagning /5-22/.

Homogeniseringsförloppet vid svällning och kom-

pression studeras i geotekniska mätutrustningar i avsikt att ge underlag för materialmodell att användas i FEM-analys (ABAQUS). Modellerna är avsedda att användas i deponeringshåll/bergsprickgeometri. I Stripa pågår sedan 1986 högtemperaturtest vid 170°C med en fransk smektitrik lera.

Erosionsförhållandena i bentonitgel har studerats i laboratorium /5-23/. Mikroskop användes för att identifiera erosionsmekanismer. Resultatet verifierar teorier om hur strömmande vatten påverkar de kohesiva partikelbindningarna. Ökad förståelse av bindningarna mellan grannpartiklar erfordras. Detta sammanhänger med en allmän reologisk modell för smektitrika leror som är ett mål för forskningen inom detta område.

5.3.3.4 Effekter av gas

Vid mätningar av gaskonduktivitet i porösa material i rutintester gäller liksom vid mätningar av hydraulisk konduktivitet att medelvärden erhålles. Om det är stor variation i porsystemet kommer inte verkliga hastigheter att mätas.

Mikrostrukturen i smektitisk lera kan innebära stor variation i porsystemet. Gaskonduktiviteten är beroende av hur det sammansatta systemet lermineral och vatten kan bilda ett kontinuerligt porsystem för inträngande gas, vilket också beror på tryckförhållandena och gasflödet. Tidigare mätningar av gastransport genom SFR-buffertar /5-24/ visade att ett kritiskt gastryck utgjorde en karakteristisk materialparameter som huvudsakligen bestäms av smektitkomponentens densitet och homogenitet, att gaspenetration äger rum i ett mycket begränsat antal passager, att den deplacerade vattenmängden vid uppbyggnad till kritiskt gastryck och gasgenombrott utgör en liten del av totala porvolymen och att genombrott inträffar först när gastrycket utgör summan av kritiskt gastryck och rådande vattentryck.

Med syfte att bl a visa densitetens betydelse för gas och vattenflöde i densitetsområdet högkompakterad Na-bentonit och det lösare tillstånd som finns i ler/ballastblandningar, har en modell föreslagits /5-25/, vilken skall kontrolleras eller förfinas i det fortsatta forskningsarbetet.

5.3.3.5 Tätningåtgärder i borrhål och schakt

Det internationella samarbetet i Stripa har möjliggjort tester i realistisk miljö av bl a tätningar i borrhål och simulerade schakt och tunnlar /5-26, 27, 28/. Det har visat sig möjligt att tätningåtgärder i berget kring deponeringshåll och pluggar i schakt också i relativt tätt berg kan vara möjliga att utföra med utvecklad teknik /5-29/. I Stripa fas 3 ingår prov med sådan teknik. I en första etapp /5-30/ har valts bentonit- och cementbaserade material att båda provas i fortsatta tester i Stripa-gruvan.

Borrhål och schakttätningar erfordrar stor uppmärksamhet i programmet för utveckling av metod för slutförvaring av KBS-3-typ med flera schakt till förvaringsutrymmen på ca 500 m djup utspritt på någon km² yta. För att bra kunna utnyttja tätningmöjligheterna erfordras också en utvecklad metodik för kva-

litetsbeskrivning av omgivande berg, så att tätningarna utförs med god strategi och med hänsyn till de geohydrologiska förhållandena. Det är av stor betydelse att kunna karakterisera bergets konduktiva förhållanden i närzonen, så att sambandet med övriga preferentiella vattenvägar i berget erhålles. En första analys har gjorts av en process för kvalitetsbeskrivning av berget i slutförvarets närzon och dess sammanhang med bergets sprickzoner av geohydrologisk betydelse. Stripa och berglaboratoriet utgör potentiella övningsfält för sådan metodutveckling.

5.3.3.6 Modellutveckling för barriärfunktion

SKI förutsätter att utvecklingen av modeller som beskriver processer av betydelse i samband med och efter deponering sker i nära samarbete med grupper som studerar olika delområden. Som framgått ovan, sker modellutvecklingen i nära samarbete när det gäller mekanik. Det är samma grupp som gör materialmodell samt beräknar och gör valideringstester.

För studier av migration av radionuklider samarbetar TVO och VTT i Finland med SKB och Clay Technology AB när det gäller att mäta diffusion och tolka förutsättningarna härför med tillgänglig materialmodell.

Som framgått av avsnittet om långtidsstabilitet, 5.3.3.1, sker utvecklingen av modell för buffertens kemiska beständighet i direkt samband med studium av leror. I övrigt kemiskt avseende sker modellutvecklingen i andra grupper.

Utveckling av modell för radionuklidmigration kopplad med grundvattenströmning i berg, modell för

kapselkorrosion, och modell för bränsleupplösning, berör de kemiska förhållandena och beskrives i andra avsnitt av forskningsprogrammet.

5.3.3.7 QA-program

IAEA anger att kvalitetssäkringen kräver uppmärksamhet när det gäller buffert och återfyllningsmaterial och föreslår högre prioritet i detta avseende i samband med denna forskning i framtiden (tidigt 1990-tal).

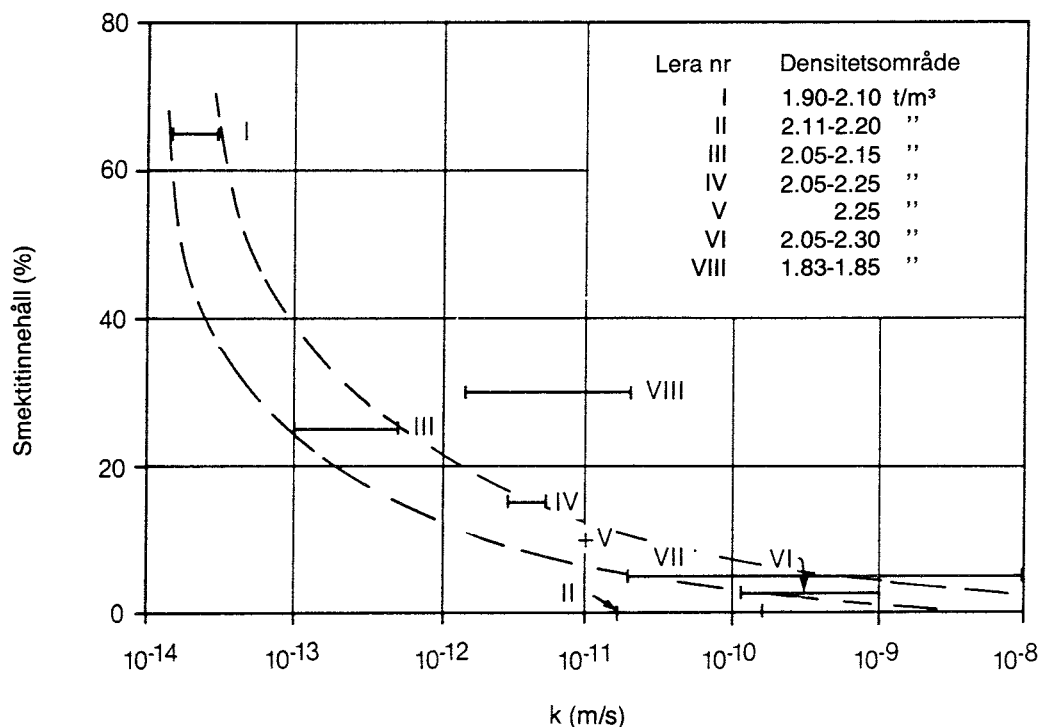
Som framgått av avsnittet om tätningåtgärder, 5.3.3.5, är tilltron till beskrivningen av bergets kvalitet viktig, inte minst när det gäller att ange det sammanhang som finns mellan tätningsmaterialen och berg med termer som anger förutsättningarna för hur funktionen kan förväntas bli under lång tid efter utförandet. Frågan har blivit ägnad uppmärksamhet i samband med utvecklingen av metoder för tätning av berg i Stripa-projektet fas 3.

5.3.3.8 Sammanfattning av forskningsresultat

Beskrivning av tekniska barriären, buffertmaterial med avseende på transportförhållanden

De egenskaper som karakteriserar transportförhållanden genom buffertmaterialet är låg hydraulisk konduktivitet och låg diffusivitet.

Den hydrauliska konduktiviteten bestäms främst av densitet och smektitinnehåll, se Figur 5-6. Ett urval av väl definierade leror har jämförts med referensleran i KBS-3, dvs Mx 80, en lera av Wyoming-typ med mest natrium som adsorberad jon. Jämförelsen visar att



Figur 5-6 Hydraulisk konduktivitet/smektitinnehåll för åtta leror. Smektitinnehåll är här procentandel av den totala mängden. Bredden på det i figuren markerade området representerar spridningen för hydraulisk konduktivitet hos smektitileror med en densitet på minst 2,0 t/m³ vid vattenmättnad.

med bevarad hög densitet är den hydrauliska konduktiviteten låg även om smektithalten minskar /5-31/. Smektithalten kan minska i buffertmaterial genom omvandling av smektit till illit i en takt som beror på temperaturen. En ökad förståelse av sambandet mellan mikrostruktur och temperatur som erhållits genom studier av leror i hydrotermaltester, har lett till en mer nyanserad modell för temperatureffekter, /5-19/. Denna modell har prövats i studiet av naturliga bentoniter. Ett viktigt bidrag har varit den gotländska bentonit som ligger på ca 500 m djup vid Hamra. Modellen innebär att en kritisk temperatur är 150 °C. Under 105 °C sker obetydliga förändringar beroende på en långsam reaktion av Arrhenius-typ. I intervallet 105 °C till 150 °C kan permanenta förändringar inträffa av betydelse för mikrostruktur, men illit/smektit blandskikt-bildning är obetydligt eller inte alls förekommande. Slutsatsen är att i deponeringshål är temperaturer 105 °C à 120 °C möjliga i kompakt bentonit utan att mineralförändringar skall få betydelse för barriärfunktionen.

En inventering av svenska buffertmaterialkandidater har utförts, varvid en utvecklad teknik för kvantitativ XRD-analys (Reynolds) har prövats. Tekniken medger att andelen av ingående lermineraller i ett prov kan bestämmas med en noggrannhet på $\pm 10\%$. Inventeringen visar inte på några större fyndigheter av svenska material för buffert i deponeringshål, men väl material för återfyllning. /5-32/.

Beskrivning av tekniska barriären buffertmaterial med avseende på mekaniska förhållanden

Buffertmaterialen skall samverka med berg och kapsel så att en lämplig miljö erhålles för kapseln. Således skall kapseln bäras av materialet i deponeringshålet och skyddas från ogynnsamma belastningar eller eventuella rörelser härrörande från berget.

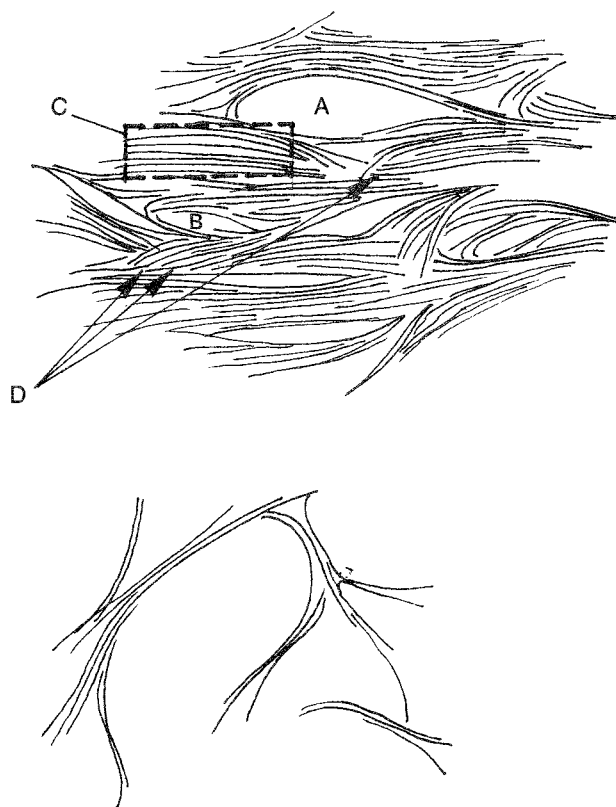
Bentonit kan formändras och ändra sin volym genom omfördelning, upptagning eller avgivning av vatten. Vattnet i högkompakterad bentonit utgör ungefär en fjärdedel av volymen och det fysikaliska tillståndet är olika beroende på lermineralet och mikrostrukturen. Under lång tid har variationen i densitet mätts och diskuterats och indirekta mätningar med flera metoder har använts. Exempel på sådana är NMR som sedan många år prövats i SKB-forskningen för att söka avslöja arten av samverkan mellan lermineralet och vatten, /5-18/.

En modell för det fysikaliska tillståndet hos vatten i olika delar av mikrostrukturen, se Figur 5-7, har betydelse för att få en teori för reologin att tillämpa vid formuleringen av materialmodellen och för att kunna extrapolera förhållandena under lång tid, t ex för kryp, se avsnitt 5.3.3.3 och /5-33/.

Reologiska egenskaper för bentoniter har mätts /5-34, 35/. Sättningen av simulerad kapsel i deponeringshål har studerats i laboratoriet, se Figur 5-5. Under tiden april 85 — dec 86 och i Stripa pågår observationer, i båda fallen med temperaturvariationer.

Skjuvförsök med modeller simulerande kapsel i deponeringshål har utförts /5-36/.

Matematiska modeller med FEM har använts för



Figur 5-4 Övre delen:

Kompakt natriummontmorillonitlera

A) Stor por

B) Litet utrymme med externt vatten

C) Stack eller kvasikristall med organiserat interlam-närt vatten

D) Kontakt mellan stackar

Nedre delen:

Utsvälld natriummontmorillonitgel med mycket tunna stackar och praktiskt taget enbart externt vatten.

jämförelser /5-37/. Dessa visar att det går att modellera hastighets- och temperaturberoende i mer eller mindre dynamiska förlopp såsom termomekaniskt eller tektoniskt inducerande skjuvdeformationer eller sättningar av kapslar.

Beskrivning av återfyllning och andra tätningåtgärder

I strävan att minska vattenomsättningen i avfallens närzon utanför bufferten ingår återfyllning med täta massor i bergutrymmen och tätning av sprickor i omgivande berg. Förvaringstunnlarna kan återfyllas i nedre delen med idag känd teknik och utrustning. Erfarenheter från Stripa där återfyllning med 10—20% bentonit i blandning med ballast använts /5-22/ har visat att packningsmetod och utrustning för den översta delen av förvaringstunnlarna kan utvecklas. Försöket visade bl a att vattenupptagningen skedde med låga vattentryck i närzonen i omgivande berg trots relativt höga tryck längre ut i berget. Återfyllningen utfyllde tunneln fullständigt men packningsgraden kan ökas med utvecklad teknik för anbringande av fyllning i tunnelns övre del. Pluggning av schakt, borrhål och tunnel

/5-26, 27, 28/ provades också. Erfarenheterna från dessa tester har lett till att i en tredje fas i Stripa provas tätning av bergsprickor. Berget som omger BMT-orten planeras bli tätad i etapper, så att den hydrauliska konduktiviteten minskar på ett mätbart sätt. Av särskilt intresse är att få data om den störda zonen som omger tunneln så att om möjligt sprängningseffekter och spänningsovlagrings effekter kan särskiljas. Teori och erfarenhetsdata kan tyda på att konduktiviteten är flera magnituder högre längs tunneln jämfört med den radiella strömningsriktningen. Tätningsåtgärder i berget som omger deponeringshål provas, liksom tätning i naturlig sprickzon.

Åtgärderna skall ses som exempel på tätningsåtgärder avsedda att ingå i en strategi som omfördelar vattenströmningen från avfallens närzon. Den förutsätter kunskap om mönstret av mer konduktiva zoner som kommunicerar med närzonen och storleken på mer täta bergvolymer däremellan, se kapitel 6.

I forskningen ingår laboratorietester för och analys av långtidsstabiliteter hos tätningsmaterialen baserade på cement och bentonit.

5.3.4 Forskningsprogram 1990-1995

Forskningen om sammanhangen mellan lerors mikrostruktur och förhållanden av betydelse för transport i buffertmaterial fortsätter. Studierna breddas till att

också omfatta blandningar med naturmaterial och bergkrossmaterial med mål att presentera materialmodeller för

- vattenströmning,
- diffusion,
- värmeledning,
- beteende i gränsen mot rörligt vatten i bergsprickor.

Reologiska egenskaper provas i laboratorium för buffert- och återfyllningsmaterial för materialmodeller att användas i teoretisk modellering för

- termomekanik,
- kryp,
- skjuvdeformation,
- svällning, kompression, homogenisering,
- bergspricktätning.

I forskningen ingår utveckling av metoder för kvalitetssäkring som bygger på karakterisering av material och dess samverkan med kapsel och berg.

I FoU-programmet ingår utveckling av packningsmetoder för återfyllningsmaterial i förvaringstunnlarnas övre delar med mål att identifiera hur metoderna i sig påverkar de isolerande egenskaperna. Ett förslag till metod för användning i fältskala utarbetas, vilket kommer att ligga till grund för framtagning av utrustning och senare praktiska prov i simulerad förvaringsmiljö.

6 BERGETS EGENSKAPER

6.1 ALLMÄNT

6.1.1 Bergets roll i slutförvaret

Berget är en förutsättning för en säker slutförvaring av använt kärnbränsle enligt den princip som utvecklats i Sverige och många andra länder. Berget har ett antal fundamentala egenskaper som utnyttjas för förvarets långsiktiga säkerhet.

Viktiga fundamentala funktioner är:

- mekaniskt skydd
- kemiskt stabil miljö och
- långsam och stabil vattenomsättning.

Berget ger ett långvarigt mekaniskt skydd för yttre påverkan, som också kan orsakas av människan. Ett slutförvar i berg ger också ett gott skydd mot förändringar i klimat. Klimatförändringar kan ge en förändrad biosfär, väsentligt höjd havsnivå, alternativt ge upphov till permafrost och bildning av glaciärer. Påverkan från sådana förändringar minimeras om ett slutförvar placeras i djupa geologiska formationer.

Av grundläggande betydelse är att den kemiska miljön är bestående. Grundvattnets reducerande kemi är av stor betydelse för kapselns livslängd och för bränslematrisens långsamma upplösning. Kemin bestäms till största delen av bergets mineralsammansättning som är bestående under mycket långa tidsrymder. Bergets kemiska miljö är även viktig för hur radionuklider kan transporteras. Här är växelverkan mellan nuklider och berg av betydelse. Egenskaperna är till stor del knutna till bergets matris som inte förändras nämnvärt under årmiljonerna.

Den låga grundvattenomsättningen i berget har betydelse både för barriärernas beständighet och för långsam transport av nuklider i berget. Vattenomsättningen styrs till stor del av markytans topografi, av bergets sprickighet och rådande bergspänningar. Dessa faktorer är alla bestående till sin natur. Därför kommer den grundvattenomsättning som sker kring ett förvar inte att förändras i betydande grad med tiden.

För en analys av slutförvarets funktion måste förvarets komponenter och deras växelverkan beskrivas över långa tidsperioder. Då det är svårt att med experiment klarlägga hur denna långsiktiga växelverkan sker på en specifik plats används teoretiska modeller.

I vilken mån använda modeller är valida är av grundläggande betydelse för analysen. För modeller av berget finns vissa specifika egenheter som diskuteras närmare i avsnitt 6.3.2. Berget är ogenomskinligt och det är stora volymer av ett komplext, heterogent medium som ska beskrivas. Beskrivningen grundas ofta på ett flertal punktinformationer från borrhål som sedan generaliseras till olika skalor allt efter det specifika problem som ska analyseras.

Vissa växelverkningar i ett förvar påverkas endast av ett fåtal av bergets parametrar. För att beräkna kapsellivslängd t ex krävs endast data om grundvattnets lokala omsättning och dess kemi.

Att beskriva hur nuklider fixeras och transporteras i berget kräver mer information. Grundvattnets flödesfördelning måste beskrivas över stora volymer. Olika modeller tillämpas av olika forskargrupper. Vissa av dessa förutsätter en beskrivning av flöde i enskilda sprickor. Detta medför stora krav på datainsamling. Andra modeller förutsätter strömning i ett poröst styckevis homogent medium, vilket är en alltför grov approximation i många tillämpningar.

Det är en angelägen uppgift för den pågående forskningen att pröva dessa modellers giltighet och begränsningar.

6.1.2 Undersökning av berg

Undersökningar av berg för slutförvar sker stegvis där de efterföljande stegen blir alltmer detaljerade och där innehållet i undersökningsstegen successivt anpassas till behoven och den information som kommer fram i undersökningarna.

Det är fruktbart att genomföra och presentera undersökningarna i olika skalor. En grov indelning som används här, se Figur 6-1, är

- regionalskala, 1—10 km,
- anläggningsskala, fjärrområdet, 100—1000 m,
- blockskala, fjärr/närområdet, 10—100 m,
- detaljskala, närområdet, 0—10 m.

Närområdet brukar definieras som det område närmast avfallet som kan tänkas bli påverkat av avfallet eller av berguttaget; enbart en mindre temperaturhöjning inräknas därvid ej. Närområdets storlek beror av slutförvarets utformning. Man kan ha ett närområde för varje avfallskolli vid vissa utformningar.

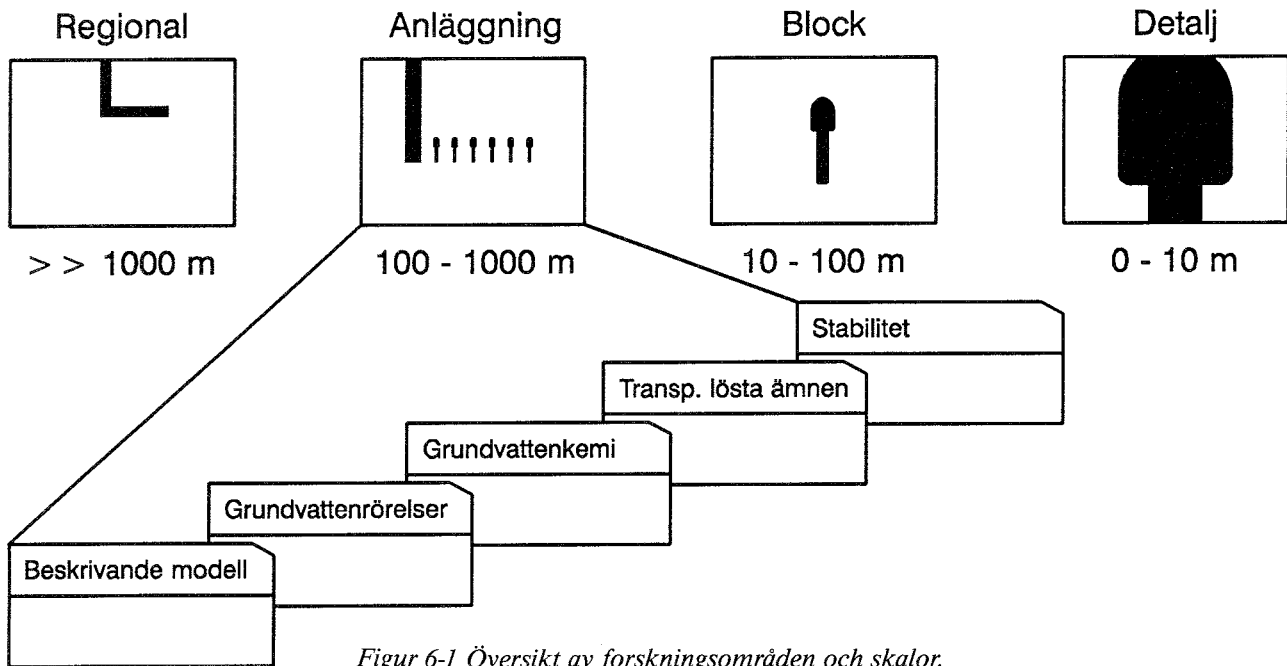
För varje skala kan de grundläggande funktionerna studeras, dvs upprättande av beskrivande modell, grundvattenflöde och -kemi, transport av lösta ämnen och mekanisk stabilitet.

Det är angeläget att bergundersökningar för ett slutförvar bedrivs i en sekvens enligt:

- observationer (data),
- bearbetning av observationer för att upprätta en begreppsmodell över området (strukturer och fysikaliska processer),
- beräkningar,
- utvärdering.

Denna sekvens drivs stegvis mot högre detaljering allteftersom informationen förbättras i varje undersökningssteg.

Undersökning av berg för utformning och analys av säkerhet



Figur 6-1 Översikt av forskningsområden och skalor.

I de olika undersökningsstegen skall man beskriva bl a:

- grundvattenomsättning,
- grundvattenledarnas geometri och egenskaper,
- grundvattnets kemi.

Undersökningarna ska anvisa vilka volymer som är av intresse för fortsatta detaljundersökningar. Volymer av intresse för förvarsplacering ska anges. Vidare ska de volymer definieras som senare behöver karakteriseras mellan förvar och utströmningsområden. Undersökningarna ska ge underlag för förvarets geometriska utformning. Riktmärken för slutförvarets utformning är:

- låg grundvattenomsättning i förvarets närzon,
- respektavstånd till potentiella zoner för framtida bergrörelser.

Anpassningen av slutförvaret bör ske stegvis och med stora möjligheter till flexibilitet.

6.2 BERGETS GRUNDVATTENRÖRELSE

6.2.1 Mål för FoU-verksamheten 1990-1995

Huvudmålen för forskningen inom området bergets grundvattenrörelser är att:

- vidareutveckla och pröva metoder för lokalisering och karakterisering av sprickzoner och vattenförande sprickor,
- bredda databasen för vattenförande sprickor och sprickzoner med de data som behövs i modeller,

- vidareutveckla modeller som beskriver grundvattenströmningen i berg,
- pröva olika modellers användbarhet och beräkningsresultatens tillförlitlighet.

En stor del av denna forskning genomförs inom ramen för berglaboratoriet, se vidare kapitel 9. För perioden 1990-1995 kan följande delmål nämnas:

- att utvärdera resultaten från Stripa-projektets fas 3 för att specifikt ta ställning till om ytterligare experiment behövs för att karakterisera den sk störda zonen, för att utvärdera spårprovsteknik i underjordsanläggningar och för att utvärdera användbarheten av numeriska sk nätverksmodeller,
- att utvärdera spårprovstesterna i Finnsjön för att specifikt ta ställning till i vad mån använd teknik ger underlag för beräkning av transport av radionuklider i sprickzoner,
- att upprätta program för de förundersökningar, beräkningar och redovisningar som ska genomföras på kandidatplatserna,
- att upprätta program för de detaljerade undersökningar som ska genomföras.

6.2.2 Nuvarande kunskapsläge

Grundvattnets rörelser har betydelse för att beskriva slutförvarets funktion och säkerhet.

För att genomföra en trovärdig analys av grundvattnets rörelser, förutsätts en god beskrivning av det fysiska mediet där strömning sker. Vidare förutsätts att de använda teorierna ansluter till hur strömningen fysiskt sker i mediet. Här finns det praktiska (och ekonomiska) gränser för hur långt beskrivningen i de olika undersökningsstegen kan drivas.

Viktigt är också att redovisa hur modeller kan upprättas och valideras med de data som föreligger i olika undersökningssteg. Modeller upprättas med olika grundförutsättningar och kan tillämpas i olika skalor, vilket helt styr vilka data som samlas och hur de utvärderas. För validering av modellerna krävs därmed också experiment i olika skalor.

Det finns idag endast ett fåtal anläggningar i berg där hela kedjan undersökningar — beräkningar — utvärdering av grundvattenströmningar genomförts och dokumenterats.

Observationer och data om berget och om grundvattenrörelser i berget behöver bearbetas och analyseras ur olika aspekter. De viktigaste av dessa är:

- tillgängliga bergvolymen av viss kvalitet,
- förekomst av flödesvägar,
- underlag för förvarets utformning i olika skalor,
- underlag för analys av grundvattenomsättning i olika skalor,
- beskrivning av vattnets strömningsvägar i förvarsområdet och dess omgivning.

6.2.2.1 Observationsmetoder för grundvatten i berg

I detta avsnitt redovisas översiktligt nuvarande kunskapsläge vad gäller möjligheten att i fält samla relevanta data för att beskriva grundvattnets rörelser. För att knyta an till naturliga undersökningssteg redovisas aktuella metoder under rubrikerna

- ytundersökningar,
- borrhålsundersökningar,
- tunnelstudier.

Undersökningsmetodik och instrument som används för detta är utförligt beskrivna i avsnitt 8.2.

YTUNDERSÖKNINGAR

I ytundersökningar ingår t ex geologiska karteringar, flyg- och markgeofysiska mätningar. Tyvärr är det i allmänhet svårt att ur befintligt material från undersökningar i svensk berggrund entydigt redogöra för metodernas tillämplighet och begränsningar. Vidare är värdet av olika metoder olika för olika platser. För att på en vald plats utvärdera metodens begränsningar måste man upprätta prognoser. Dessa prognoser kan sedan kontrolleras genom att andra, oberoende ytundersökningsmetoder styrker prognosen. Andra möjligheter att pröva prognoserna är borrhålsundersökningar eller undersökningar från tunnlar. Ytundersökningar ger normalt en mycket god täckning av markytan, men det är svårt att utnyttja denna ytinformation för att upprätta tredimensionella beskrivningar.

Den geologiska baskartering som sker i landet genom Sveriges Geologiska Undersökning visar tex bergartsfördelning och tektonik i markytan. I ingenjörsgelogiska sammanhang /6-1/ uppmuntras det dock till att utarbeta tredimensionella beskrivningar av berggrunden i form av prognoser. Där framhålls även vikten av att dessa prognoser upprättas stegvis.

Denna strategi tillämpas konsekvent för undersökningarna i berglaboratoriet, där prognoser upprättas i flera skalor. Detta ger möjligheten att i de fortsatta un-

dersökningarna belysa värdet av undersökningar från ytundersökningar. Första steget i undersökningarna har presenterats /6-2/.

Ett flertal ytundersökningsmetoder har utnyttjats för att ge en samlad regional bild över geologi, geohydrologi och grundvattenkemi. I de fortsatta undersökningarna finns det möjlighet att jämföra dessa prognoser med resultat från djupa borrhål och ifrån tunnlar.

En viktig del av en bergbeskrivning är att ange bergartsfördelningen, eftersom bergarten påverkar grundvattnets kemi, vattengenomsläpplighet och strukturer /6-2/.

Geologisk kartering ger en god beskrivning av bergartsfördelningen i markytan. Den regionala karteringen underlättas av geofysiska flygmätningar. För berglaboratoriet uppmättes de magnetiska och elektriska egenskaperna, liksom berggrundens strålning. Kopplingen mellan geofysiska indikationer och bergart kunde sedan bekräftas med kartering och petrografiska undersökningar. Den geologiska/geofysiska tolkningen visade även på bergarternas djuputsträckning (diapirer). Kompletterande tyngdkraftmätningar genomfördes och tolkades, vilket visade att yngre (och lättare) graniter finns på någon kilometers djup under markytan. Den geologiska karteringen och tillämpad geofysik ger därmed utrymme åt att i regional skala beskriva en tredimensionell bergartsfördelning.

De detaljerade undersökningarna som genomfördes över södra Äspö visade att ytundersökningar har begränsat värde för att beskriva bergartsfördelningen på djupet. Data från borrhållsundersökningarna visade en oväntad förekomst av en kvartsfattigare bergartsvariant -diorit- på ca 300 m djup. Det är möjligt att detaljgravimetri kan utnyttjas för att belysa eventuella bergartsvariationer i tre dimensioner.

En annan viktig del av bergbeskrivningen är att beskriva berggrundens svaghetszoner. Kartering ger god möjlighet att beskriva den geometriska fördelningen av berggrundens brantstående strukturer. Kartering underlättas och kan kompletteras med information från t ex flygbildstolkning, geofysik, topografisk analys m m. Det är ofta svårt att beskriva zonernas karaktär i kartering, om området inte är fullständigt blottlagt. Av stort värde är möjligheten att blottlägga geologiska profiler, på liknande sätt som skett över Äspö i samband med undersökningarna för berglaboratoriet /6-3/. Vad avser berggrundens subhorisontella strukturer kan en omsorgsfull kartering och tolkning även ge bidrag till att beskriva dessa /6-4, 5/.

Lantmäteriverkets digitala databas har utnyttjats för att upprätta tektoniska tolkningar. Studium av topografien ger lineament, framförallt vertikala strukturer. Lineamentens längd, bredd och riktning kan utnyttjas för att beskriva svaghetszoner. Zoner kan dock ha mycket skilda karaktärer som inte kan upptäckas i kartor.

Magnetiska och elektriska metoder används rutinemässigt för att kartlägga berggrundens zoner. Allmänt sett begränsas dock utsträckningen till hundra meters djup. Tolkning av flera sammanvägda metoder ger indikationer om stupning av zoner.

Av intresse är här den utvärdering av geologi och

geofysik som genomfördes i samband med byggandet av den 80 km långa Bolmentunneln i södra Sverige /6-6/. Kartering i samband med utbyggnaden kunde jämföras mot den geologiska och geofysiska beskrivning som upprättades före och under bygget. Det visades bl a:

- flygmagnetiska mätningar indikerade 80% av alla zoner över 50 m men 25% av zoner mindre än 50 m i bredd,
- markgeofysik (VLF och Slingram) indikerade 80% av alla zoner över 50 m och 60% av smalare zoner,
- resistivitetsmätningar indikerade 95% av alla zoner över 50 m bredd och 80% av zonerna mindre än 10 m,
- refraktionsseismik indikerade 60% av zonerna över 50 m i bredd och 13% av de mest utpräglade zonerna med bredd mindre än 10 m.

Det konstaterades att en kombination av geofysiska metoder ofta är nödvändig för att upprätta en god beskrivning. Vidare att det — med valt avstånd på mät-punkter i profiler — är svårt att detektera zoner mindre än 10 m och sådana zoner som är subhorisontella. Prognoser över förekomsten av vatten i berg kunde ej upprättas enbart på basis av geofysiska undersökningar.

En geofysisk metod som haft begränsad tillämpning i Sverige är ytlig reflektionsseismik. Analys av reflektionsseismiska undersökningar har redovisats i /6-7/ och /6-3/. För att få god beskrivning av de översta hundra metrarna behöver tidsupplösning och apparatur vara bättre än den som använts i nämnda undersökningar. I /6-8/ är t ex upplösningen 0.25 ms att jämföra med 0.5 ms för undersökningarna på Äspö. Reflektionsseismiska undersökningar för URL i Canada påvisade tidigt den sk Fracture Zone 2. Det är väl värt att satsa vidare på denna teknik för ytundersökningar, eftersom den ger volyminformation och samtidigt ger möjlighet att detektera de subhorisontella zoner som kan vara svåra att upptäcka med andra metoder. I det ca 7 km djupa borrhål som borrades i Siljan för att pröva djupgasteorin var de reflektionsseismiska undersökningarna av stort värde.

Med täta reflektionsseismiska profiler, bedöms det vara möjligt att åstadkomma en god geologisk modell i tre dimensioner. Sådana undersökningar kan relativt lätt göras även för områden under vatten.

Sammanfattande värdering

Ytundersökningar ger basen för en första geologisk tolkning av en plats.

Det är av värde att ytundersökningar sker parallellt med olika metoder och att undersökningarna successivt utvärderas i steg. Det är idag svårt — beroende på begränsad dokumentation — att generellt utvärdera vad ytundersökningar ger i förhållande till undersökningar i borrhål. Det måste också betonas att ytundersökningar bör platsanpassas, eftersom det är plats-specifikt vilka metoder som är de mest lämpliga att utnyttja. Det är väsentligt att allt material, geologiskt, geofysiskt, geohydrologiskt och grundvattenkemiskt samtolkas i steg.

Svårighet att klarlägga den sanna omfattningen av subhorisontella strukturer måste särskilt beaktas. Ytbeskrivningar utgör grunden för utsättning av borrhål och ger därmed även grunden för tolkningen av de data som senare erhålles från borrhålsmätningar.

BORRHÅLSUNDERSÖKNINGAR

Borrhålsundersökningar ger informationer som kompletterar ytundersökningar. Vad avser geologi och geofysik är det i grund samma metoder som används både för yt- och borrhålsundersökningar. Borrhålen kan också utnyttjas för mätningar mellan flera hål för att skaffa en volymbeskrivning av berget sk mellanhålsmätningar. I förhållande till förvarsvolymen är antalet borrhål mycket begränsat. Inom det franska avfallsprogrammet /6-9/ framhålls t ex att antalet undersökningshål från markytan ska begränsas till ett minimum.

Mellanhålsmätningar

Mellanhålsmätningar utförs för att fastställa svaghetszoners utsträckning mellan borrhål eller för att få medelvärden på bergets egenskaper mellan borrhålen. Olika metoder används. De vanligaste är hydrauliska mellanhålsmätningar där hydraulisk respons (tryckfortplantning) analyseras. Dessa mätningar kombineras ofta med spår försök, där olika spårämnen tillsätts i ett borrhål och vattenprover hämtas ur närliggande hål. Mellanhålsmätningar genomförs också med seismiska och elektriska (radar) metoder.

Interferensmätningar

Hydrauliska mellanhålsmätningar (interferensmätningar) genomförs för att erhålla information om hydrauliska samband i bergmassan.

Utvärdering av mätningarna ger värden på flödesvägarnas vattengenomsläpplighet (transmissivitet) och även information om deras geometriska utbredning. Mellanhålsmätningar har utförts både inom ramen för SKBs sprickzonsprojekt i Finnsjön /6-10/ och för berglaboratoriet /6-3/. Den mätteknik som har använts har fungerat mycket tillfredsställande, liksom utvärderingen av resultaten. Interferensmätningar har även genomförts som en del i undersökningarna för SFR /6-11/ där de bidrog väsentligt till att öka förståelsen av de hydrauliska sambanden kring slutförvaret samt för att medelvärdesbilda över större volymer.

Radarmätningar

Borrhålsradarn beskrivs mera utförligt i kapitel 8. Tekniken för radarmätningar i den typ av berg som finns i Sverige har vidareutvecklats inom ramen för det internationella Stripa-projektet, se kapitel 10. Mätningar med radar kan utföras dels som reflektionsmätningar och dels med tomografisk analys. Radartomografi förutsätter hög mättäthet så att området eller mätplanet mellan borrhålen genomkorsas av ett stort antal mätlinjer. Från mätdata kan sedan två typer av tomogram konstrueras vilka representerar radarsigna-

lens dämpning respektive dess utbredningshastighet.

SKB har genomfört två särskilda metodprov av vilka det ena var ett blindprov där mellanhålsradar, utan tillgång till annan information, skulle användas för att beskriva bergets egenskaper. Metodprovet genomfördes i samband med en tunnelborrning i Stockholm från vilken man i efterhand kunnat utvärdera prognosens godhet /6-12/. Radarn predikterade en stor, flack zon som sedermera penetrerades av tunneln. Det visar sig att radarn också identifierar ett antal smärre anomalier som inte haft betydelse för tunneldrivning. Ur studien framgår också att tekniken för utvärdering av tomogram har förbättrats avsevärt under loppet av några år.

SKB har också i Stripa provat en metod med saltvatteninjektion i samband med radarmätning. Denna metod bedöms vara av stort framtida värde. Eftersom radarn är känslig för mediets resistivitet kunde skillnaden mellan tomogram framställda före och under saltvatteninjekteringen användas för att kartlägga de områden i berget som var vattenförande. Som kontroll registrerades samtidigt saltvattenhalten i de använda borrhålen. Då mätningarna gjordes i fler borrhål med lämplig konfiguration kunde en tredimensionell bild av flödesvägarna framställas /6-13/.

Mellanhålsseismik

Inom Stripaprojektet har borrhålsseismiska undersökningar vidareutvecklats av /6-14, 15/. Även för denna metod har utvecklingen avsett mellanhålsmätningar med tomografisk analys.

Inom Stripaprojektets Fas 2 genomfördes mellanhålsmätningar i två skalor, dels inom ett ca 200 m block och dels med upp till tusen meter mellan borrhålen. Mätningar i den stora skalan som bl a skulle användas för att prova tredimensionell tomografisk analys var inte särskilt lyckosamma. Detta kan till viss del förklaras av att borrhålskonfigurationen ej var lämplig. I den mindre skalan däremot var resultaten mera lovande. Metoden utvecklas vidare bl a med avseende på sändarutrustningen, se även kapitel 8.

Vertical Seismic Profiling (VSP-mätning) är en annan seismisk metod där mätning sker från punkter på markytan på olika avstånd och riktnings riktning ett borrhål, till mottagare i borrhålet. Denna metod har inte provats inom SKBs program.

Enkelhålsmätningar

Kärnkartering

Borrkärnan kan karteras med stor noggrannhet med avseende på bergart, sprickkaraktär, sprickfyllnads-material m m. Av stor vikt är analysen av sprickmineralen, som ger möjlighet att uppskatta en relativ ålder för olika grundvattenskedan. Det är t ex möjligt att beskriva när kalcitläkning ägt rum, jämför kapitel 7 och /6-3, 6-16, 17/.

Geofysik

Geofysiska loggningar av borrhål med flera metoder kompletterar varandra så att flera sammanfallande

anomalier utnyttjas för beskrivning av bergmassan. Systematiska studier har genomförts för att korrelera loggningsresultat mot tex hydrauliska parametrar /6-84/ eller för att studera samband mellan radaranomalier och övrig borrhålsinformation /6-18/. Systematiska korrelationer har även genomförts för berglaboratoriet /6-3/.

Statistisk bearbetning av korrelation mellan olika data har påbörjats. Det finns ingen enstaka geofysisk metod som entydigt kopplar mot hydraulisk konduktivitet eller hydraulisk sprickfrekvens. Resultaten i /6-84/ antyder att hydraulisk konduktivitet kan predikteras med relativt få data från borrhålet. Starkt vattenförande zoner indikeras av samtidig lågresistivitet (single point resistance) och höga gångtider (sonic). Dessa zoner sammanfaller ofta med ökad uppsprickning, krossat berg och med järnutfällningar i sprickor. Inom typområdet Klipperås verkar det vara de subhorisontella zonerna som är mest konduktiva.

I en studie av /6-18/ har radarsignalerna från mätningar i Klipperås, Finnsjön, Saltsjötunneln, Ävrö och Stripa utvärderats och korrelerats mot annan borrhålsinformation. Studien visar att det finns god korrelation mellan hög radarintensitet och uppsprickning i bergmassan. Korrelation mellan radarintensitet och hydraulisk konduktivitet är god för mätningarna i Stripa, men inte för de andra platserna. Det framgår även att det finns hydrauliska partier i bergmassan som inte detekteras med radarmetoden. Radarn visar på potentiellt konduktiva zoner. Det värdefulla med radarn är att den är en volymbeskrivande metod som visar strukturella (geometriska) egenskaper i bergmassan långt ut från borrhålet — ända upp till 150 m med nuvarande utrustning. Upplösningen är beroende på vald mätfrekvens.

Av särskilt intresse är att kunna bestämma sprickors orientering i borrhålet. Här synes en sk televiewer vara lämplig, se vidare kapitel 8.

Hydraulmätningar

För att bestämma bergets vattengenomsläpplighet utförs vatteninjektionsmätningar mellan manschetter i borrhål. Manschettavståndet är normalt från 20—30 m ner till 2—3 m, men i specialstudier /6-10/ har ända ner till 0.11 m använts. Med förfinad utvärderingsteknik /6-3/ kan utvärderingsgränsen bli så låg som 10^{-12} m/s för 3 m manschettavstånd. Av stor betydelse är att utvärderingen av den hydrauliska konduktiviteten tar hänsyn till den skala som mätningarna sker i. De flesta av mätningarna sker i en skala som är under den Representativa Elementar Volymen (REV), dvs den minsta storleken för vilken approximationen med ett poröst medium antagande är användbar. Manschettavståndet är viktigt, eftersom det inte är möjligt att beskriva den rumsliga variationen av den logaritmerade konduktiviteten i borrhålet i skalor mindre än manschettavståndet /6-19/, om inte transmissivitetsfördelningen kan knytas till annan information från borrhålet /6-20/.

Inom ramen för det bilaterala avtalet mellan US DOE och SKB har data från typområdesundersökningar använts för att lämna rekommendationer för

optimalt manschettavstånd /6-20/. Det rekommenderas att korta manschettavstånd — några gånger större än medelsprickavståndet — används.

I undersökningarna för berglaboratoriet har en ny typ av mätningar införts för att mäta hydraulisk konduktivitet /6-3/. Flödesloggning har genomförts i djupa kärnborrhål i samband med att dessa provpumpas. Det vertikala vattenflödet mäts längs hela hålet under pumpen och de vattenförande partierna kan på detta sätt detekteras. Mätningar genomförs för ett 1000 m långt borrhål på några timmar. Mätning sker för varje meter och de mest konduktiva zonernas transmissionsivitet beräknas. Vidare har en unik serie av mätningar med olika manschettavstånd genomförts, så att medelkonduktivitet och varians har belysts i olika skalor.

Flödesmätningar

Av stort värde för förståelse av grundvattnets rörelser är möjligheten att direkt genomföra mätningar av grundvattenflödet. Ett särskilt instrument, utspädningssond, har utvecklats för detta ändamål. Mätningar har genomförts i Finnsjön, /6-10/. Det bedöms att denna typ av mätningar är av stor betydelse, eftersom det därmed ges möjlighet att direkt jämföra beräknade och mätta värden på vatten omsättning.

Hydrauliskt tryck

Mätning av grundvattentryck är väsentligt för att förstå drivkrafterna för grundvattnet. Tryckmätningar hade avgörande betydelse för hur de numeriska modellerna utnyttjades för SFR /6-21/. Det är dock komplicerat att utvärdera tryck när vattnets densitet varierar och resultaten måste justeras för detta. Detta är väsentligt om tryckmätningar används för att validera beräkningsmodeller för grundvatten.

Bergspänningsmätningar

Spänningsmätningar har genomförts, dels för att korrelera den hydrauliska konduktiviteten med spänningsnivåerna, dels för att studera om riktningen på största huvudspänningen sammanfaller med anisotropier för grundvattenströmningen /6-3, 6-10, 6-17/.

Utvärdering av spänningsmätningar är inte trivial. Genom det samarbetsavtal mellan AECL/SKB som upprättats för karakterisering av 240 m nivån i URL, har ett stort antal data utvärderats /6-22, 23/. Det visade sig att spänningsresultaten påverkades av bl a tektonik, mineralkornsstorlek, mikrospäckor och borrhåningsteknik. I det höga spänningsfältet på 240 m nivån medförde detta främst att mätningar i borrhål med stor vinkel till största huvudspänningsriktningen tenderade att ge resultat med största erhållna huvudspänningen orienterad parallellt med borrhålet. Det bedöms att problemen kan identifieras genom geologisk kartering av överborrade kärnor och genom sk parameterkontroller. Geologisk kartering koncentreras på mineralogiska inhomogeniteter i anslutning till mätcellen, samt strukturer såsom foliation och synliga mikrospäckor. Vid URL konstaterades att det var svårt att tolka mätresultaten om den volymetriska töjningen överskred 0.07% /6-22/.

Sammanfattande värdering

Mätningar i borrhål baseras på avancerad teknik och är resurskrävande. För att utvärdering senare ska vara möjlig krävs att flera oberoende metoder utnyttjas. Det är idag svårt att avgöra den specifika nyttan av den enskilda metoden. Det bedöms att borrhålmätningar och ytundersökningar sammantaget ger tillräcklig information för att göra preliminär utvärdering av förvarets funktion och dess geometriska utformning och för att anvisa lämpliga bergvolymeter för detaljerad karakterisering.

UNDERSÖKNINGAR I TUNNLAR OCH SCHAKT

Detaljundersökningar och utbyggnad av ett slutförvar medför att tunnlarm och schakt konstrueras. Det är av primärt intresse att utnyttja dessa tunnlarm och schakt för att göra observationer av berggrunden. På samma sätt som för ytundersökningar ger tunnlarm tillgång till ytor för observationer. Den generaliserade geologiska bild som erhålles från ytundersökningar och från punktinformation i borrhål kan bekräftas och kompletteras. Vad avser grundvattenrörelser ger borrhålen punktinformation, medan tunnlarm ger möjlighet till mer detaljerad analys av hur vattnet geometriskt fördelar sig i berggrunden. Vid utbyggnad av tunnlarm kan tryckresponser i omgivande borrhål successivt utvärderas och jämföras med utvärdering som tidigare upprättats på grundval av yt- och borrhålsinformation. Det inläckage som sker till tunneln är av intresse för att utvärdera giltigheten av modeller för grundvattenrörelser. Den totala inläckande vattenmängden kan utnyttjas för att kalibrera den totala grundvattenomsättningen i området. Grundvattnets geometriska fördelning kan användas för att beskriva flödesvägarna. Det är även möjligt att i en tunnel samla in prover på grundvattnets kemi. Jämförelse mellan kemireultat i olika punkter och vid olika tidpunkter underlättar tolkningen av grundvattenrörelser.

En principiell studie som beskriver hur en tunnel kan utnyttjas för att successivt samla data om närområdet under en förvarsutbyggnad har sammanställts /6-24/.

Grundvattnets fördelning

Inom Stripa-projektet har genomförts både två- och tre-dimensionella spår försök för att belysa grundvattnets rörelse i bergmassan. De grundläggande tvådimensionella försöken i en enstaka spricka visade på vattnets ojämna fördelning över sprickplanet. Strömningen i ett sprickplan kan förenklat beskrivas ske i flödesstråk, kanaler, vilka bildats genom de båda sprickytornas oregelbundna form /6-25, 26/.

De tredimensionella försöken omfattade en relativt stor volym av bergmassan. Olika typer av spårämnen injicerades från borrhål, 10 till 55 meter upp från den ort till vilken dessa förväntades strömma. Den i orten uppsamlade mängden spårämnen varierade från tiotals procent av injicerad mängd till tusendelar av procent. Fyra av de nio typerna av injicerade spårämnen

återfanns aldrig i uppsamlingsorten /6-27/. Försöken bekräftade kanalströmningsfenomenet. Resultaten i övrigt har dock visat sig svårtolkade och några entydiga förklaringar till de erhållna resultaten har inte rapporterats.

Resultaten från Stripa-försöken visar att för spår-försök i tunnlar är det nödvändigt att noga karakterisera försöksområdet. Strömning sker i gradientens riktning, endast om att konduktiviteten är isotrop. Det är således nödvändigt att ta hänsyn till anisotropi för att beskriva flödets riktning, då det i närområdet till en tunnel finns enskilda sprickplan som kan styra strömningen. Vid uppläggnings av kommande spår-försök bygger man vidare på dessa erfarenheter.

Tunnelobservationer hade även viss betydelse för säkerhetsanalysen av SFR /6-28/. Man kunde inte utsluta antagande om en hög "kanalisering" i berggrunden. Indata till analysen erhöles genom att SFR-tunnlarna karterades med avseende på de inläckande ytornas storlek. Man antog härvid att grundvattnets uppträdande utanför tunneln motsvarade vad som karterades i form av inläckage. För att underbygga modellen utnyttjades även data från andra studier /6-29/. En sammanställning av data från SFR, Stripa, Kymmen, Saltsjötunneln och från andra anläggningar pågår. Det är dock ännu inte klart vilken relevans dessa data har för att tolka grundvattnets rörelser under naturliga förhållanden.

En tunnel ger upphov till spänningsomlagringar. Dessa medför i allmänhet att konduktiviteten i tunnelns närhet förändras. Med erfarenheter från SFR, minskar konduktiviteten tvärs tunneln. Det är en allmänt utbredd uppfattning att den axiella konduktiviteten ökar. Detta är viktigt med hänsyn till att vid ett ev utläckage av nuklider till den "störda zonen" ökar möjligheten till kortslutning mellan tunneln och omgivande sprickzoner. Det finns få experiment som genomförts för att studera denna effekt. Det sk buffert-försöket i Stripa /6-30/, stöder uppfattningen att den axiella konduktiviteten ökar. Det pågående injektions-experimentet i Stripa kommer att ge ytterligare data om den axiella konduktiviteten, se kapitel 10. Förutom av spänningsomlagringar, påverkas konduktiviteten nära tunneln av sprängningsförfarandet, där framförallt tunnelbotten skadas vid sprängning. Andra effekter att ta hänsyn till är potentialskillnaden mellan tunnelns tak och tunnelns botten och kapilläreffekter.

Genom samarbete med AECL i Kanada har det varit möjligt att analysera ett av de mer väldokumenterade försöken som belyser hur en tunnel påverkar den närliggande bergmassan /6-31/. AECLs berglaboratorium URL ligger i den sk Lac du Bonnet batoliten som är extremt sprickfattig. I Rum 209 på 240 m-nivån finns det dock en enstaka kraftigt vattenförande spricka som övertväras av en tunnel. Innan tunneln byggdes borrades hål parallellt med denna. Hålen instrumenterades så att förändringar i vattentryck, transmissivitet, bergspänningar och bergdeformationer kunde övervakas under utsprängningen av tunneln. Resultaten visar att den hydrauliska konduktiviteten tvärs tunneln har förändrats. Förändringen varierar över tunnelns periferi på så sätt att konduktiviteten minskat i tak och väg-

gar, men ökat i tunnelns botten. Eftersom sprickplanet tvärs tunneln hade mycket hög styvhet, har det bedömts att den minskade konduktiviteten i tak och väggar beror på att strömningen påverkas av omättade förhållanden och/eller materialtransport in i sprickan. Den ökade konduktiviteten i tunnelns botten förklaras som en effekt av sprängning.

Tunnelförsök har även genomförts i Hylte i samband med nyanläggning av ett vattenkraftverk /6-32/. Studierna har haft karaktären av erfarenhetsinsamling inför planering av berglaboratoriet. Detta har bl a omfattat samordning av datainsamling och tunnelproduktion. Geologisk kartering vid tunnelfront, pilotborrning och hydrauliska tryckuppbyggnadstester har genomförts med denna inriktning. Flera olika typer av spårämnen har prövats. För närvarande pågår kvalitativa spår-försök, för att med UV-ljus pröva en teknik att optiskt registrera spårämnesgenombrott i tunnlar.

Sammanfattande värdering

Data från tunnlar utnyttjas redan för analys av förvars funktion och säkerhet. Tekniken för datainsamling behöver utvecklas så att den information om t ex tryck-responser som uppstår under utbyggnad tillgodogörs på bästa möjliga sätt i beskrivningen av platsen. Att de data som erhålles vid tunnelkarteringar m m verkligen är relevanta för grundvattnets fördelning under naturliga förhållanden behöver belysas ytterligare.

6.2.2.2 Begreppsmodeller

De observationer som samlas från fältmätningar, in situ försök och laboratorier behöver bearbetas och generaliseras i begreppsmodeller.

En begreppsmodell över t ex grundvattenströmning består av två undermodeller. Den ena är strukturmodellen där bergets heterogeniteter definieras geometriskt. Definitionen omfattar volymer och/eller ytor och/eller endimensionella strömrör. Strukturmodeller kan upprättas i olika skalor med relativt hög noggrannhet beroende på tillgängliga data.

Den andra undermodellen — processmodellen — beskriver vilka fysiska fenomen som tillämpas på den strukturella undermodellen. Strömningen kan t ex vara stokastisk, vara mättad, omättad, ta hänsyn till densitetskontraster i vattnet, termisk konvektion m m.

Eftersom utformning och analys sker stegvis och i varierande skalor, är det av stort värde att upprätta dessa begreppsmodeller i olika skalor. För närvarande finns det flera alternativa möjligheter där varje begreppsmodell ställer olika krav på parameterunderlag och data.

Bereppsmodellerna bygger i princip på laminär, viskös strömning, men söker olika vägar för att förenkla beskrivningen av bergets sprickor och hålrum, där grundvattnets rörelse sker. Beroende på data och behov kan begreppsmodellerna vara deterministiska eller stokastiska.

Begreppsmodellen identifierar också det databehov som föreligger. För beräkning av t ex nuklidtransport med strömrörmodell är vattenomsättningen, strömrörens längd till biosfären, indiffusion av nuklider i

bergmatrisen, sorption av radionuklider på sprickytor, strömrörens kontaktyta mellan det strömmande vattnet som innehåller radionuklider och berget, antalet strömrör och flödesfördelning mellan strömrören väsentliga parametrar.

De flesta beräkningar sker med antagande om mätad strömning och att vattnets densitet är oberoende av djupet. Mot bakgrund av att det är visat att vattnets salthalt och densitet ökar mot djupet i den svenska berggrunden är dessa beräkningar starkt förenklade och överdriver vattenomsättningen i berggrunden i förhållande till den situation som råder. Beräkningsresultaten kan i allmänhet styrkas med grundvattenkemiska observationer, flödesobservationer eller tryckobservationer.

De grundvattenkemiska observationerna är att föredra. Det gränsskikt som återfinns mellan det lättare söta vattnet och det tyngre salta vattnet ger en god möjlighet att kontrollera beräkningsresultat. Gränsskiktets läge styrs av och är extremt känsligt för den regionala grundvattensituationen. Om god överensstämmelse mellan de grundvattenkemiska och beräknade värdena erhålles är detta ett starkt indicium på att den använda modellen är giltig.

Gränsskiktet visar att de drivande krafter som topografin utgör kortsluts av sub-horisontella och -vertikala zoner. Av betydelse är då att studera om termisk konvektion kan uppstå under gränsskiktet. Vidare är det av värde att studera gränsskiktets stabilitet för att se hur läget förändras av tryckförändringar, landhöjning, antagande om konduktivitetfördelning i berget mm. Principiella studier av gränsskiktets stabilitet ingår som en del i undersökningarna för berglaboratoriet.

Flödesobservationer har blivit möjliga att genomföra med SKBs utspädningssond Metodiken har stort värde för att kunna stämma av numeriska beräkningar. För validering av begreppsmodeller är tryckobservationer av begränsat värde om beräkningsresultaten avser tryck på flera hundra meters djup. Tryckskillnaderna är där så små att det är möjligt att anpassa radikalt olika geologiska modeller och ändå få god överensstämmelse /6-33/.

Begreppsmodeller för grundvattenströmning i sprickigt berg kan indelas på olika sätt som nämnts tidigare.

I det följande redovisas några använda begreppsmodeller.

Ekvivalent poröst medium

I kristallint berg sker strömningen företrädesvis i bergets nätverk av sprickor. Genom att bortse från de individuella egenskaperna i sprickorna utan istället beräkna ett fiktivt medelflöde genom berggrunden utnyttjas kontinuumsbegreppet. Härigenom underlättas den matematiska beskrivningen av problemet. Grundläggande för att denna medelvärdesbildning från den mikro- till den makroskopiska skalan ska vara giltig är att bergvolymen över vilken medelvärdesbildning sker är större än den Representativa Elementar Volymen (REV) /6-34/.

Med hänsyn taget till den variation som finns för transmissivitet i den svenska berggrunden bedöms att det behövs flera tusen vattenförande sprickor för att få stabila medelvärden på konduktivitet, dvs medelflödet

måste beräknas över km^3 stora bergvolymen. Ur den synpunkten är det rimligt att använda kontinuumsantagande för studier av regional grundvattenströmning. Det bör noteras att flera forskare är osäkra på om REV överhuvudtaget existerar.

Denna modell har använts för beräkningar i regional skala. De ger en översiktlig beskrivning av inströmnings- och utströmningsområden, en beskrivning av vattenomsättningen och strömbanornas längd. De ger även randvillkoren för de beräkningar i mindre skala som senare genomförs.

De regionala beräkningarna kan jämföras med flödesobservationer. Ibland jämförs grundvattenbildning mellan mätning och beräkning. Denna jämförelse ger visst stöd åt beräkningsresultaten, men är relativt kontroversiell, eftersom grundvattenbildningen i naturen är svår att fastställa. Viktig är tillämpningen av flödesmätningar i borrhål som genomförs med utspädningssond. Ett exempel på en lyckad mätning och tolkning framgår av /6-10/. I den subhorisontella zonen vid Finnsjön mättes grundvattenflödet tvärs borrhål och jämfördes med resultat från tryck- och konduktivitetsbestämningar, se Figur 6-2. Flödesmätningen illustrerar på ett övertygande sätt att subhorisontella zoner kan fungera som hydrauliska barriärer. Över zonen är vattnet sött. Under zonen är vattnet salt och stagnant. De grundvattenkemiska resultaten visar att det salta vattnet har en ålder av minst 7 000 år, sannolikt äldre.

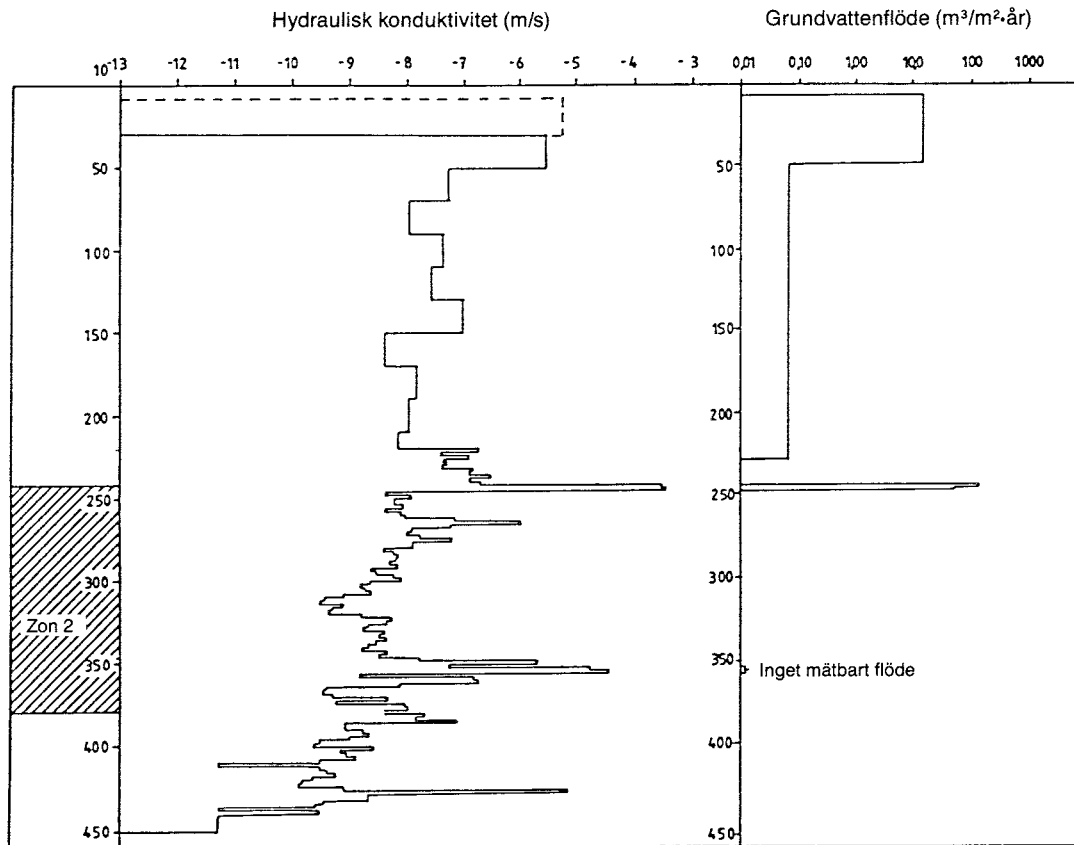
Resultatet understöds även av den principiella numeriska modellering av gränsskiktet som genomförts, /6-3/.

Det har diskuterats vilken inverkan randvillkoren har på de beräkningsresultat som erhålls i regionala beräkningar. En analys har genomförts för Klipperås /6-35/. För de beräknade fallen är tryckfördelningen relativt opåverkad av antaganden på konduktivitetfördelning. För en subregional tredimensionell beräkning påverkades inte vattenomsättningen eller flödesvektorerna för olika antaganden på randvillkor, ej heller tryckfördelningen.

Beräkningar med begreppsmodellen ekvivalent poröst medium har framförallt skett med datorprogrammet GWHRT /6-36/. Detta har verifierats inom ramen för HYDROCOIN /6-37, 38, 39/. Programmet har använts i säkerhetsanalyserna för KBS-3 och SFR. GWHRT använder finita elementmetoden för att lösa det kopplade problemet med grundvattenströmning och värmetransport i tre dimensioner. Tryck-, flödes- och temperaturfördelning kan beräknas liksom strömbanor för partiklar frisläppta från en viss nivå.

För tredimensionella exempel med realistisk geometri blir antalet beräkningspunkter stort och begränsade datorresurser har satt en gräns för hur omfattande beräkningar och parametervariationer som har kunnat utföras. Gränsen för modellstorleken ligger hittills kring 12 000—15 000 beräkningsnoder för ett stationärt och icke-kopplat exempel.

För kommande analyser kommer även programpaketet NAMMU att användas. NAMMU är ett generellt utvecklat program för numerisk beräkning av grundvattenströmning, värme- och nuklidtransport i tre dimensioner. Omfattande dokumentation finns såväl som fortlöpande programutveckling och underhåll.



Figur 6-2 I figurens vänstra del visas resultat från mätningar av vattengenomsläppligheten i borrhål BFI 01 vid Finnsjön. Borrhålet skär igenom den flacka Zon 2. I figurens högra del visas resultaten från flödessond. Under zonen är vattnet stagnant.

Det som nämnts ovan om utdata och datorbegränsningar för GWHRT gäller även för NAMMU.

NAMMU har liksom GWHRT verifierats inom HYDROCOIN.

Stokastiskt kontinuum

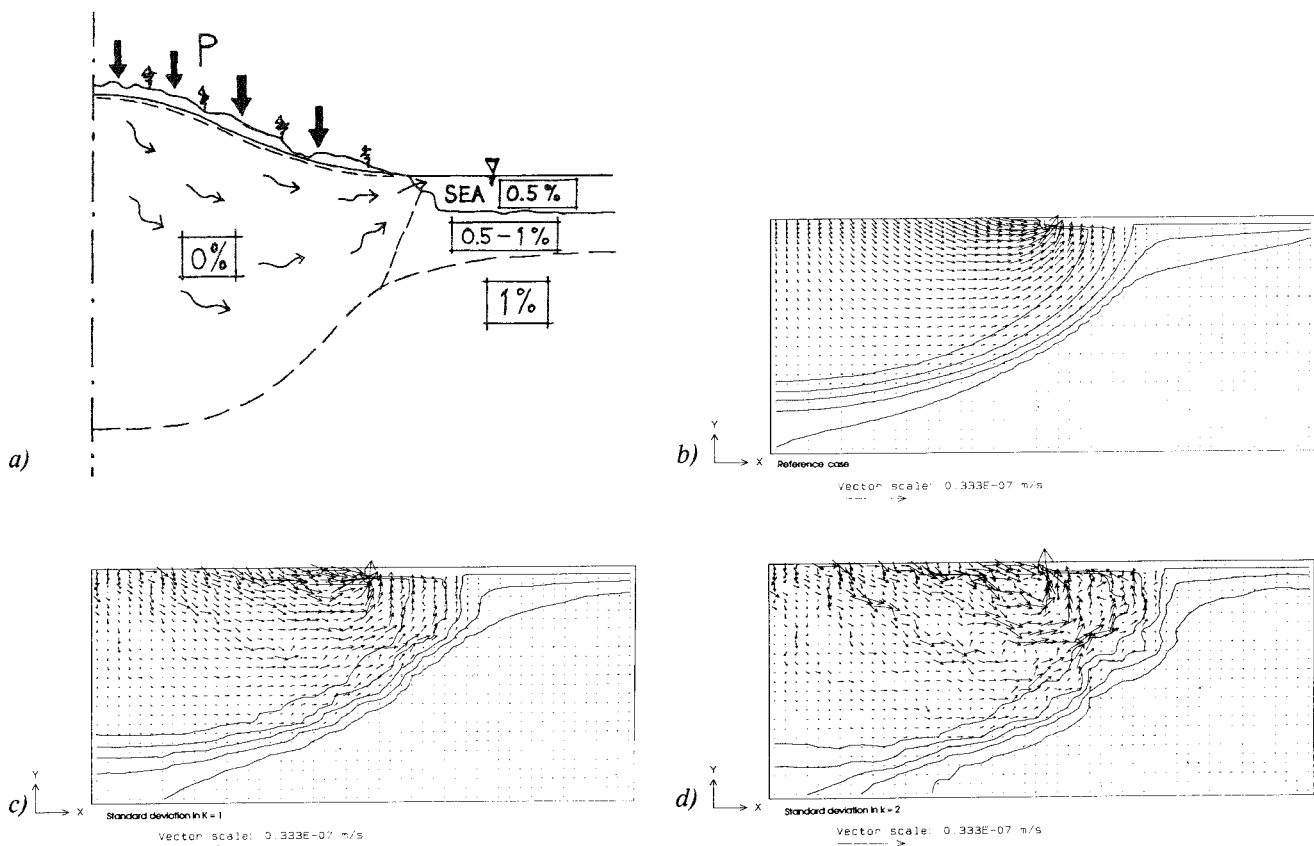
Det har föreslagits /6-19/ att en stokastisk kontinuumsbetraktelse är en möjlig metod för att enhetligt och systematiskt beskriva grundvattenflöde och nuklidtransport i berg. I denna begreppsmodell antas en statistisk fördelning av den hydrauliska konduktiviteten. Konduktivitetsens geometriska läge i modellen är stokastisk. Metodiken är intressant för att beskriva grundvattnets flödesfördelning, men det är ännu inte klart att angreppssättet är tillräckligt för att beskriva nuklidens fixering och transport i berget, eftersom dessa även styrs av kemiska processer. Modellen har indirekt använts för att studera hur gränsskiktet mellan sött och salt vatten påverkas av spridningen i den hydrauliska konduktiviteten /6-3/. Ett intressant resultat är att variationerna i konduktiviteten ger stråk i berget med stora flöden, medan andra partier blir stagnanta. Denna flödesfördelning blir mer uttalad ju högre spridning som finns i konduktiviteten. Beräkningar har genomförts med en finit differensmetod, se Figur 6-3.

Diskreta nätverksmodeller

Inom Stripa-projektet prövas möjligheten att beskriva grundvattenströmning med nätverksmodeller. I dessa modeller simuleras de enskilda sprickornas egenskaper. Modellerna kan antingen vara deterministiska eller stokastiska.

Med tillämpning på data från det tredimensionella spår försöket inom Stripa projektet /6-27/ har det prövats om nätverksmodellering kan vara en framkomlig väg när det gäller att beskriva och förklara grundvattnets fördelning i en sprucken bergmassa /6-40/. Problemet vid nätverksmodellering är dock tillgången på relevanta och tillräckliga data vad gäller t ex sprickplanens utbredning och transmissivitet. Arbetet inom Stripa-projektet kommer att bidra till att ge ökad klarhet i beräkningsmetodens begränsningar och krav på ingångsdata.

Det har även prövats om nätverksmodeller kan upprättas på basis av typområdesdata /6-41/. Det var möjligt att kalibrera injektionsmätningarna och nätverksmodellen, men kalibreringen var okänslig för t ex spricklängd och spricktäthet som är väsentliga parametrar för nätverksmodellen. För att nätverksmodeller skall kunna användas måste mätningar utföras så att en väsentligt förbättrad strukturell bild av berget ges. Det är inte säkert att detta är möjligt. Vidare är det



Figur 6-3 Beräkningar för att studera stabiliteten mellan gränsskiktet mellan det söta och det saltare, tyngre vatten som påträffas i kustnära områden.
 a) Geohydrologisk situation. Salthalt i %.
 b) Grundvattnets strömning i ett homogent medium.
 c) Grundvattnets strömning i ett medium där den hydrauliska konduktiviteten är stokastiskt fördelad. Standardavvikelsen $\ln K=1$.
 d) För ett mera heterogent medium, $\ln K=2$, blir grundvattnets strömning koncentrerad till vissa partier. Gränsskiktet blir "tillknäppt".

osäkert om den fysikaliska beskrivningen av flödet i nätverksmodellerna är relevant för nuklidtransport. Sprickorna modelleras som parallella skivor. Spricköppningen mellan de parallella skivorna beräknas indirekt på grundval av manschettmätningar och/eller spår försök.

Den fysikaliska verkligheten är däremot att flödet sker i delar av sprickplanen — strömrör (channelling), vars frekvens och fördelning styrs av bl a gradientens riktning och storlek. Det är inte heller uteslutet att största delen av flödet sker i sprickkors, vilket även betonas på strukturgeologiska grunder /6-3/.

En stokastisk modell som antager att spricköppningen för en enskild spricka varierar har prövats /6-42/. Det framgår tydligt att ytsorption och matrisdiffusion har stor inverkan på makrodispersiviteten i en spricka.

Inom ramen för tredje fasen av Stripa-projektet utvecklas och anpassas olika numeriska beräkningsprogram baserade på diskret nätverksmodell. En beskrivning av ett antal beräkningsmodeller som används samt av pågående verifieringsövningar finns i /6-43/. Nedan beskrivs två av modellerna kortfattat.

NAPSAC är en tredimensionell nätverksmodell som beräknar det stationära flödet genom ett givet rätblock med finita elementmetoden. Flödet antas ske enbart genom ett nätverk av sprickor och inom dessa antas flödet vara linjärt beroende av tryckgradienten. Modellen kräver som indata statistiska fördelningar av de olika parametrarna som beskriver nätverket. Beräkningarna måste upprepas ett stort antal gånger för olika realiseringar av spricknätverket. Utdata är det stationära flödet och även flödets spridning. Programmet utvecklas på uppdrag av Stripa-projektet av Harwell Laboratory i England /6-44/. Verifiering och validering kommer att utföras inom detta projekt. Begränsade datorresurser sätter idag gränsen för utnyttjandet av denna modell.

JINX står för "Joints In Networks" och är ett samlingsnamn på ett antal datorprogram /6-45, 46/. Även JINX används inom fas 3 av STRIPA projektet. JINX består av en persondatorbaserad grafisk preprocessor för generering av sprickgeometrier och finita elementnät, FRACMAN. MAFIC beräknar sedan med finita elementmetoden det stationära eller transienta flödet genom spricknätverket. Både flöde genom

sprickplan och bergmatrisen kan simuleras. MAFIC kan även användas för att beräkna nuklidtransport längs nätverkets strömbanor. Programmen är fortfarande under utveckling.

Ekvivalent diskontinuum

Ett mellanting mellan stokastiskt kontinuum och en nätverksmodell är ekvivalent diskontinuum-modellen /6-43/. Modellen används i Stripa, fas 3. Särskilda automatiska algoritmer används för att generera ett nätverk som minimerar avvikelse mellan modell och mätdata. Det är uteslutet att det verkliga nätverket återskapas. Modellen är intressant för studier av grundvattnets flödesfördelning. Angreppssättet är på grundforskningsstadiet och det är osäkert i vilken mån det i framtiden kan användas för beräkning av nuklidtransport.

Strömrörmodell

En starkt förenklad modell för grundvattnets flödesfördelning i berggrunden är strömrörmodellen /6-28/. Indata för flödesfördelning bygger huvudsakligen på data som samlats i samband med tunnelkartering. Grundvattenflödet är mycket ojämnt fördelat i sprickzoner och i sprickor. De preferentiella flödesvägarna ska inte ses som geometriska egenskaper, utan de är bl a beroende av gradienten och gradientens riktning och de lokala transmissiviteterna i spricknätverket, vilket även belysts i numeriska modeller /6-47/. Kemisk transport är inte bara beroende av flödesfördelningen, utan också av den kemiska växelverkan som finns mellan de i vattnet lösta ämnena och omgivningen. Strömrörmodellen är en starkt förenklad beskrivning av grundvattnets fördelning och hur nuklider fixeras och transporteras. Strömrören betraktas alternativt vara oberoende eller punktvis sammanhängande. I det senare fallet sker blandning av vatten.

Data till strömrörmodellen hämtas från tunnelkartering och förutsätter att denna ger en relevant statistisk fördelning av grundvattnets flödesvägar. I vilken mån detta är fallet behöver studeras ytterligare.

Sammanfattande värdering

De begreppsmodeller som idag finns utvecklade kan beskriva vattenomsättning och flödesfördelning med tillräcklig noggrannhet för att t ex preliminärt utforma ett slutförvar eller utvärdera livslängden hos avfallskapslar förutsatt att data för förvarsberget tas fram (med existerande metoder).

I säkerhetsanalysen av ett slutförvar vill man beräkna hur radionuklider transporteras med grundvattnet. Det är i dag inte möjligt att göra detta med önskvärd noggrannhet. Man kan ej ange vilken modeller eller kombination av modeller som bäst representerar verkligheten. Man tvingas därför i analysen använda pessimistiska modeller som starkt överdriver transporten.

De begreppsmodeller som finns kan kalibreras mot experiment, men de är inte särskiljande i förhållande till hur den fysiska strömningen sker i berget. Spår försök med icke-sorberande och svagsorberande spåräm-

nen kan vara en möjlig väg att särskilja begreppsmodellerna. Det är ännu inte visat att spår försök ger möjlighet att diskriminera mellan olika begreppsmodeller. SKB har i senare års säkerhetsanalyser använt strömrörmodellen för beräkning av nuklidtransport, eftersom den ger den mest konservativa modellen för hur berget fungerar som barriär.

Det kan vara värt att notera att UKDOE i en översikt har presenterat en översikt av beräkningsmodeller för grundvattenrörelser och nuklidtransport /6-48/. I denna rapport bedöms det vara av värde att vidareutveckla metoder för strömning i sprickiga medier, gastransport och geostatistiska metoder.

6.2.2.3 Validering av modeller för grundvattnets rörelser

Hur väl modeller kan beskriva verkligheten karakteriseras med begreppet validitet. Begreppet validitet diskuteras för närvarande inom flera projekt, se avsnitt 3.3.6.

Inom ramen för berglaboratoriet arbetas också med att definiera vad validering av grundvattenmodeller innebär och kräver.

En datormodell är en matematisk realisering av en begreppsmodell inom ramen för en definierad och verifierad datorkod. Idealt sett ska den beskrivande modellen sammanfalla med datormodellen, men detta låter sig inte alltid göras beroende av begränsningar i datorkoden. För att pröva datormodellens giltighet kan den kalibreras mot storheter som är uppmätta i fält. Målet med en kalibrering är att minimera avvikelsen mellan datormodell och mätvärde genom att justera modellens parametrar.

När överensstämmelsen mellan datormodell och mätvärden är god är modellen kalibrerad mot en given uppsättning data. Den kalibrerade datormodellen kan sedan användas för att beskriva storheter i systemet som inte utnyttjats vid kalibreringen — prediktiva beräkningar. Dessa prediktionsberäkningar kan senare användas för nya jämförelser mot mätningar.

Validering innehåller flera moment, t ex en systematisk jämförelse mellan prediktion och utfall och en bedömning om överensstämmelsen är god.

Validering kan ske mot olika storheter t ex tryckförändringar, grundvattenflöde, förändringar av grundvattenkemi m m. För den långsiktiga säkerheten för ett förvar är det av värde att definiera vilka typer av valideringar som är av störst betydelse. Sådana avvägningar kan ske genom systematiska funktions- och säkerhetsanalyser. För berglaboratorieprojektet pågår ett arbete för att systematiskt redovisa vilka utsagor som ska predikteras och valideras, samt vilka typer av mätningar m m som ska utnyttjas för att för att validera utsagorna. Sådant arbete pågår även inom bl a Stripa-projektet.

6.2.2.4 Några särskilda forskningsområden

Sprickzonsstudien

I avsaknad av data för att beskriva grundvattenrörelser i sprickzoner, antogs det i säkerhetsanalysen för KBS-3 att en radionuklid som når en sprickzon omedelbart

när biosfären. För att bredda kunskapsunderlaget pågår sedan flera år sprickzonsstudier bl a vid Finnsjön. Avsikten är att studera nuklidfördröjning i sprickzoner, undersökningsmetoder samt inverkan av sprickzoner på regionala grundvattenrörelser.

Den första etappen av studierna vid Finnsjön har redovisats tidigare /6-49/. Under 1986-1988 har en subhorisontell ca 100 m vid sprickzon, Zon 2, detaljstudierats /6-10/ för att ge underlag för den avslutande fasens spärförsök.

I den detaljerade karakteriseringen har geologi, geohydrologi och kemi beskrivits. Zonen bildades för ca 1.6 miljarder år sedan och har sedan reaktiverats vid ett flertal tillfällen. Zon 2 är indelad i flera subzoner, där särskilt den översta är ytterligt konduktiv. Anmärkningsvärt är att de konduktiva egenskaperna är uthålliga och med likartad storlek i alla de borrhål som skär igenom subzonen. Ett preliminärt spärförsök visade på transport över 400 m på en månad. En möjlig tolkning för den höga, likformiga konduktiviteten är att zonen aktiverats i samband med sista isavsmältningen.

I zonen har grundvattenflödet registrerats med en utspädningssond. Även om stora flöden uppmättes, visade det sig att flödena längre ner i zonen var små trots hög konduktivitet. Att stagnanta förhållanden råder styrks av grundvattens kemiska sammansättning där ett saltvattensprång sker i zonen. Även om vattnet är blandat och härrör från flera källor är det klart att vattnet är relik. Att saltvattnet är stagnant understöds även av de principiella beräkningar för ett gränsskikt söt/saltvatten som redovisats /6-3/.

Den avslutande fasen av Finnsjö-arbetena omfattar spärförsök. Projektet ingår i INTRAVAL där ett flertal grupper har lämnat prediktiva beräkningar för de försök som genomförts.

Sprickzonsstudier har även inletts vid Ävrö /6-50/. Sprickzonen är ca 120 m mäktig och stupar 40°. Zonens strykning är ännu inte definitivt fastlagd. På samma sätt som vid Finnsjön har ett mer salint vatten påträffas i samband med zonen. Det har bedömts lämpligt att genomföra större delen av Finnsjöförsöken för att se i vilken mån använd teknik leder fram till svar på de relevanta frågorna innan studierna på Ävrö fortsätter.

Sprickzonstudier har även genomförts i samband med tunnelarbeten och sammanställning av resultaten pågår.

Subhorisontella zoner

Flacka zoner har betydelse för utformning av ett förvar och för analys av funktion och säkerhet. Traditionella geologiska undersökningar ger begränsad information om förekomsten av subhorisontella zoner. Det är först genom de undersökningar som genomförts i Sverige, Finland och Kanada som data har börjat komma fram om horisontella zoners frekvens och egenskaper.

I typområdet Kamlunge påträffades en subhorisontell zon på 550 m djup. Konduktiviteten var ca 100 gånger högre än omgivande berg. På samma sätt har högkonduktiva zoner påträffats i t ex Gideå, Svartboberget, Finnsjön, Klipperås och SFR. Ett flertal flacka zoner påträffades också vid undersökningarna i det

nära 7 000 m djupa hål som borrats i Gravberg för det sk djuggasprojektet.

Konduktiva, subhorisontella zoner har också identifierats på Hästholmen, södra Finland och i samband med undersökningarna för URL i Kanada.

De flacka strukturerna tycks ofta vara högkonduktiva och kortsluter de drivkrafter och strömningsvägar för djupa i grundvattenrörelser som betingas av topografien. Detta är positivt för ett slutförvar, eftersom vattenomsättningen kring ett ev förvar under en subhorisontell zon därmed minskar. För analys av förvarets funktion är zonernas egenskaper intressanta, eftersom förekomsten av subhorisontella zoner underlättar uppkomsten av termiska konvektionsceller. För undersökning av en plats och anpassning av förvaret är det angeläget att avstånd mellan subhorisontella zoner beskrivs, vilket medför krav på undersökningar till relativt sett större djup.

Störd zon

Den störda zonen kan definieras som "den del av tunnel eller, schakt var fysiska eller kemiska egenskaper förändras i så hög grad som en följd av utbyggnad av förvaret eller av värme som genereras från avfallet att det påverkar förvarets funktion."

Teoretiska beräkningar visar att spänningsomlagring kring en tunnel medför att den axiella konduktiviteten ökar kring tunneln /6-30/. Detta måste beaktas för beräkning av nuklidtransporten. Experimentella data från Stripa, fas 2, /6-30, 6-51/, antyder att den axiella konduktiviteten ökar med en faktor 1 000—10 000 gånger i en zon 0.5—1 m närmast tunnelperiferin.

Gastransport

Studier av gastransport har betydelse bl a i de fall ett förvar innehåller stål som korroderar anaerobt och därvid producerar vätgas. Dessa effekter har undersökts inom ramen för säkerhetsanalysen av SFR och för analysen av WP-Cave projektet.

För analysen av gastransport i SFR utnyttjades både ett diskontinuums- och ett kontinuumsantagande /6-52, 53/.

6.2.3 Forskningsprogram 1990-1995

De forskningsinsatser som krävs för att möta de mål som redovisats i 6.2.1 genomförs med fördel i tvärvetenskapliga projekt där geologer, geofysiker, geohydrologer, kemister och andra specialister samarbetar.

SKB planerar att i nära samarbete med universitet, högskolor och andra experter fortsätta att utveckla begrepps- och beräkningsmodeller.

För de närmaste åren utförs största delen av planerat arbete inom ramen för Finnsjön, berglaboratoriet och Stripa. De redovisas detaljerat under avsnitt 7.3.3, 9.4, 9.5 samt 10.2. Programmet för berglaboratoriet redovisas utförligt i en separat underlagsrapport.

Utveckling av begreppsmodeller

Utveckling av begreppsmodeller i olika skalor är av fundamental betydelse för att öka förståelsen av hur

grundvatten strömmar i kristallin berggrund. Berglaboratoriet arbetar parallellt från regional skala ner till volymer på något hundratal kubikmeter. Under förundersökningsskedet upprättas regionala grundvattenmodeller, diskreta nätverksmodeller och enkla transportmodeller. Dessa prövas och utvecklas under byggnadsskedet. Här pekas särskilt på betydelsen av ett spår försök under byggnadsskedet och driftskedet. Arbetena i Stripa är som framgår av tidigare beskrivning inriktade på blockskalan och på närområdet. Det sk "Site Characterization and Validation"-programmet (SCV) kommer att ge underlag för att pröva flera olika typer av modeller. Inom projektets ram arbetar tre olika grupper med modellering av experimenten. Vid det sk "Sealing of Fractured Rock"-försöket ägnas stora ansträngningar åt den "störda" zonen. Försöken i Finnsjön behandlar transport i fjärrområdesskala.

För den fortsatta experimentplaneringen krävs en ordentlig utvärdering av i vilken mån spår försöksteknik är tillämplig för att särskilja olika begreppsmodeller. En sådan utvärdering förutses både för Stripa och Finnsjöförsöken. Med en samlad utvärdering av SCV och i Stripa och spår försöken kan man planera för vilka ytterligare experiment som kan bidra till en förbättrad analys av grundvattnets strömning i berg. En utvärdering planeras ske under 1992. Denna kan påverka planeringen av spår försöken i berglaboratoriet. Tänkbara metoder är t ex:

- en utveckling av radartomografi/saltvatten -metodiken. Borrning av undersökningshål sker parallellt med en konduktiv zon,
- ett konduktivt parti av en bergmassa injekteras, för att därefter plockas ner i småbitar. Därefter karteras de partier som varit i kontakt med injekteringsmaterialet,
- typiska sprickplan gjuts av med teknik enligt injekteringsförsöken /6-54/ och monteras i tredimensionella modeller.

En fråga av annan karaktär är i vilken mån begreppsmodellerna bygger på fullständighet i dataunderlaget. Parameterbestämningar bygger på de data som samlas i ytundersökningar, i borrhål och i tunnlar. I takt med att fältundersökningarna fortsätter kommer underlaget för beskrivning flödesvägar att öka. Det torde vara svårt att generellt påvisa att undersökningarna är fullständiga. Därför är det riktigt att systematiskt genomföra osäkerhetsanalyser avseende vilken betydelse för strömningen t ex förbisedda sprickzoner har på beräkningsresultaten.

Osäkerhetsanalyser kommer att genomföras i SKB 91. Härvid är det väsentligt att beräkningsmodeller som enkelt kan ta hänsyn till slumpvis spridning i data utnyttjas och utvecklas, se nedan.

Utveckling av beräkningsmodeller

Ekvivalent poröst medium

Beräkningsdatorer med höga prestanda kommer att undanröja många begränsningar för de kapacitetskrävande finita elementmodellerna. NAMMU kommer

att användas för beräkningarna när begreppsmodellen-ekvivalent poröst medium kan anses tillämplig. Den termiskt inducerade grundvattenströmningen blir t ex av stor betydelse om förvaret läggs under en horisontell zon. NAMMU kan användas för att studera effekter av denna typ. Densitetsskiktningar av salt vatten och dess betydelse för grundvattenomsättningen är ett annat exempel. Ett nytt beräkningsprogram för sensitivitetsanalys av grundvattenströmning, GWHRT-S, har under 1989 tagits fram i en första version /6-55/. En vidareutveckling av detta kommer att fortsätta med implementering även på NAMMU. Programmet kommer att tillämpas för att studera hur olika indataparametrar och randvillkor påverkar utdata.

Nätverksmodeller

Utveckling av nätverksmodeller sker i Stripa-projektet. Detta arbete kommer att belysa användbarheten av dessa modeller för säkerhetsanalysen av ett framtida slutförvar. Följande utveckling planeras av modellerna NAPSAC och JINX:

Förutom en omfattande verifiering och validering av NAPSAC inom Stripa-projektet kommer beräkningsmodellen att tillåta mer generella modellgeometrier i framtiden. Målet är också att koppla NAPSAC till en konventionell kontinuum modell, NAMMU. Denna modell ska beräkna den regionala inverkan på strömningsfältet och automatiskt ge randvillkor för en mer detaljerad lokal analys med NAPSAC. Bland övrig planerad utveckling kan nämnas att en transportmodell ska inkluderas i programmet.

Modellpaketet JINX är under utveckling hos Golder Associates och kommer att fortsätta både inom och utanför Stripa-projektet. Inom projektet kommer verifiering och jämförelse att utföras av tre olika modellgruppers koder. Vid modellering av grundvattenförhållandena kring det blivande berglaboratoriet kommer JINX att användas. En inledande studie kommer att belysa modellens tillämpbarhet för verkliga analyser.

Tillämpning av modeller

I Tabell 6-1 redovisas översiktligt hur begrepps- och beräkningsmodeller kommer att utnyttjas i pågående projekt.

Subhorisontella zoner

Vertikala och subhorisontella zoners geometri och egenskaper är av stor betydelse. Det är angeläget att pröva bättre utrustningar och ytterligare förfinade utvärderingsmetoder för att i ett tidigt skede i undersökningar få en beskrivning av de flacka zonernas frekvens och utbredning. Riktade geologiska/geofysiska insatser har sin plats i detta sammanhang. Denna fördjupade analys kan ske inom ramen för berglaboratoriet.

Subhorisontella zoners inverkan på förvarets säkerhet kommer att belysas inom ramen för säkerhetsanalysen — SKB 91.

Tabell 6-1. Tillämpning och utveckling av modeller för grundvattenströmning, 1990—1995.

PROJEKT	MODELL					
	Ekvivalent poröst medium			Stokastiskt kontinuum	Nätverk	Strömrör
	M	D	T			
BERGLABORATORIUM						
— regionalskala	+					
— anläggningsskala		+		+		+
— blockskala	+				+	+
— detaljskala	+					
STRIPA						
— regionalskala	+					
— anläggningsskala		+			+	+
— blockskala	+					
— detaljskala	+					
FINNSJÖN						
— anläggningsskala	+					+
SKB 91						
— regionalskala	+					
— anläggningsskala	+	+	+	+		+
— blockskala	+			+		+
— detaljskala	+					

M = mättat flöde D = mättat flöde med densitetsvariationer T = termisk konvektion

Störda zonen

Störda zonen studeras inom Stripa-projektet — LSI. Utvärdering av detta försök och av de försök som sker i URL på 240 m nivån kommer att ligga till grund för eventuella kompletterande försök i berglaboratoriet. En sådan utvärdering bör ske under 1992.

Vad avser störda zonens inverkan på förvarets säkerhet kan denna effekt analyseras inom ramen för SKB 91.

6.3 BERGETS STABILITET

6.3.1 Mål för FoU-verksamheten 1990-1995

Huvudmålen är att:

- kvantifiera eller gränssätta de effekter av jordskalv, istider och landhöjningar som är av betydelse för att analysera säkerheten vid ett slutförvar för använt kärnbränsle,
- bearbeta, utvärdera och öka kunskapen om de geodynamiska processerna i Baltiska skölden.

Delmål för perioden är att

- komplettera och avsluta studien av den postglaciala rörelsezonen vid Lansjärv,

- planera och genomföra en fördjupad tektonisk analys i Sydöstra Sverige,
- genomföra en kunskapsöversikt över istider och studera deras betydelse för den långsiktiga säkerheten för ett slutförvar.

6.3.2 Nuvarande kunskapsläge

Det är av fundamental betydelse att förstå i vad mån tektoniska eller klimatiska processer påverkar förvarets funktion. Låg grundvattenomsättning, gynnsam kemisk miljö och frånvaro av berg rörelser som kan skada avfallet är vägledande för utformningen av förvaret.

De studier som genomförts styrker uppfattningen att plattektoniken tillsammans med den pågående landhöjningen efter sista istiden är av avgörande betydelse för tolkningen av nuvarande och framtida rörelser i berggrunden. Det framgår också att dessa rörelser företrädesvis eller uteslutande sker längs större sprickzoner av mycket hög ålder.

Som ett underlag för utformning och analys av förvarets funktion är det även av betydelse att beskriva i vilken mån ett slutförvar kan påverkas av framtida istider.

Ämnesområdena tektoniska och klimatiska faktorer är vittomspännande och under stark utveckling. Stora nationella och internationella projekt är för närvarande i gång som fortlöpande ger en förbättrad bild av de tektoniska processerna och effekter på berggrun-

den. Översiktliga beskrivningar över dessa fenomen och möjlig påverkan på förvar diskuteras bl a i /6-56, 57, 58, 59/.

Avsikten med nedanstående genomgång är inte att ge en fullständig kunskapsöversikt över Baltiska sköldens utveckling, utan att redovisa de arbeten som genomförts inom ramen för SKBs FoU program.

6.3.2.1 Tektoniska processer

En allmän översyn av Baltiska sköldens utveckling under äldsta tid redovisas i /6-60/. Förståelse av denna utveckling är central för indelning av Sverige i tektoniska regioner /6-61/.

Av betydelse i sammanhanget är att beskriva den Baltiska sköldens utveckling under de sista 58 miljoner åren, den tidpunkt som Skandinavien delar sig med Grönland och mittatlantiska ryggen bildas /6-62/. Nuvarande ökning av avståndet mellan Europa och Amerika är 13 mm per år.

Det är denna plattetektoniska process som tillsammans med den pågående landhöjningen styr stora delar av den seismiska aktiviteten i Baltiska skölden. De seismiska registreringar som genomförts under 1980-talet, /6-63, 64, 65/, visar att de spänningar som utlöses i jordskalv har en horisontell kompression i riktning N60W, vinkelrätt mot rörelsen i mittatlantiska ryggen. Att plattetektoniken tillsammans med avlastningen från sista istiden styr nutida deformationsprocesser i Baltiska skölden framgår även av /6-66/.

Den världsomspännande databasen World Stress Map Project visar bl a god överensstämmelse mellan rörelsevektorn för plattorna i jordskorpan och riktningen på horisontella bergspänningar.

Den mest sannolika mekanismen för att alstra överskott av horisontalspänningar i den europeiska delen av Eurasiska plattan är en påskjutande kraft — ridge push — tvärs mot strykningen av den mittatlantiska ryggen. Krafterna alstras av topografiska förhållanden samt nybildningen av oceanisk jordskorpa.

Om man utgår från dagens kunskap om att bergspänningarna till övervägande del orsakas av pågående plattetektonik krävs en ändring av den Eurasiska plattans rörelse för att alstra ett nytt spänningstillstånd. Globala processer av typen plattrörelser är beständiga över långa tidrymder och det måste betraktas som högst osannolikt att ändringar av betydelse inträffar inom de tidrymder som omfattas av slutförvar för kärnavfall.

Av annan karaktär än plattetektoniken är den pågående landhöjningen. Den snabba landhöjningen är ett resultat av isavsmältningen, även om vissa tektoniska komponenter inte kan uteslutas /6-67/. Återstående landhöjning uppskattas till 80 till 130 m och uppnås inom sju till tolv tusen år. Oregelbundenheter i landhöjningen kan noteras. Denna oregelbundenhet som noteras både från strandlinjeförskjutningar och från geodetiska precisionsmätningar, kan ha flera orsaker. De kan ha t ex ha sitt ursprung i variationer i jordskorpan tjocklek.

Av intresse i sammanhanget är om det föreligger horisontella differentialrörelser i den Baltiska skölden. Det finns ännu inga geodetiska data som understöder

detta. Mätningar bl a i Finland har skett över för kort tid för att möjliggöra slutsatser angående horisontell aseismisk krypning. Hypoteser om aseismiskt, horisontellt kryp har även framförts på basis av analys av seismiska signaler /6-65/ men giltigheten av denna analys är ännu under diskussion.

Om horisontella rörelser pågår bör det vara möjligt att med geodetiska långtidsmätningar mäta dessa. Förutsättningen är att "aktiva" zoner kan lokaliseras. Det är möjligt att sådan identifiering underlättas om gasprovtagning av Radon, $^3\text{He}/^4\text{He}$ -kvoter, /6-68/ eller ESR (elektronspinresonans) utnyttjas, /6-69/, gärna i kombination med seismiska nätverk. Morfologisk analys som genomförts inom ramen för berglaboratoriet /6-70/ bedöms också vara av värde.

För att beskriva möjliga framtida rörelsezoner är en ordentlig tektonisk beskrivning av ett framtida förvarsområde nödvändigt.

6.3.2.2 Klimatiska processer

De faktorer som styr klimatet och dess långsiktiga variationer är en väl etablerad kunskap. Dessa klimatförändringar kommer att påverka nederbörd, erosion, havsnivå och därmed biotopens utseende.

Krafterna bakom klimatförändringarna kan hänföras till variationer i jordens omloppsbana och till förändringar i atmosfärens sammansättning.

Milankovitch-cyklerna kan beskrivas i tre periodiciteter, 41 000 år (jordaxelns lutning), 22 000 år (precession) och 95 800 år (jordbanans excentritet). Effekterna av dessa förändringar kan kopplas till nedisningar under den kvartära tiden, ca 1.6 miljoner år.

Utvecklingen av den framtida atmosfärens sammansättning är mer komplicerad. Kopplingen mellan höjd koldioxidhalt i atmosfären och ökad medeltemperatur är ännu inte helt fastslagen.

Nya glaciärer kan påräknas i framtiden. Det skulle medföra nya belastningstillstånd och nya randvillkor för grundvattenrörelser. Av intresse är att veta om glaciation föregås av permafrost och om förändrad grundvattenkemi kan lösa upp befintliga sprickmineral och därmed öka vattenomsättningen genom förvaret. Ytterligare en faktor att beakta är om väsentligt ökade gradienter kan leda till stor vattenomsättning genom förvaret. Vattentrycksförhållanden under isavsmältning kan i vissa fall vara viktiga för dimensionering av t ex en kapsel.

Lansjärvsstudien har visat att rörelser har skett i anslutning till den senaste isavsmältningen, se nedan avsnitt 6.3.2.4. Denna rörelse bedöms ha skett i samband med starkt ökad seismisk aktivitet. Att den seismiska aktiviteten ökar i anslutning till randen av en glaciär understöds också av mätningar vid Arktis och Antarktis /6-71/ vilket gäller speciellt då de horisontella krafterna är större än de vertikala.

I den svenska debatten har det gjorts gällande, /6-72/ att det finns områden "fulla av förkastningar och sprickor vilka tillkommit i samband med och framförallt strax efter det att isen lämnade området för ca 10 000 år sedan".

Att rörelser sker i berggrunden vid en isavsmältning är etablerad kunskap och understöds även av genom-

förda beräkningar /6-17/. Av intresse är dock att se huruvida dessa rörelser reaktiverar gamla sprickzoner eller om nya sprickor bildas, se vidare avsnitt 6.3.2.4.

Följdfrågor är hur förvaret ska utformas så att rörelsezoner undviks. Modellstudier och variationsanalyser kan också belysa betydelsen av nya sprickor. Hittills gjorda analyser visar att effekterna är begränsade /6-73/.

6.3.2.3 Förvarets inverkan på mekanisk beständighet

Utbyggnad av ett slutförvar medför lokala förändringar av berget. Frågor att beakta i analysen är t ex:

- kan förvarsutbyggnad fungera som en "brottanvisning" för framtida rörelser?
- ger värmeutvecklingen från bränslet bestående mekaniska förändringar?

Vad avser temperatureffekter har sådana belysts för KBS-3-alternativet /6-74/. Studien innehöll analys av mekanisk påverkan, och av konvektion.

I vad mån den avgivna värmen från förvaret ger upphov till mekanisk rörelser i kapslarnas närhet bör studeras ytterligare. En sådan utvärdering görs med den närzonsmodell som utvecklas för att studera samverkan mellan kapsel och berg, se avsnitt 5.3.3.3. Det behöver även i förhållande till KBS-3 studien ytterligare belysas att den termiska belastningen inte ger upphov till storskaliga rörelser i förvarets begränsningar, medförande att nya (subhorisontella) flödesvägar öppnas från förvaret till omkringliggande zoner. En sådan analys planeras.

Ett antal olika finita elementmodeller har använts av SKB för beräkning av termomekaniska påkänningar i berget. Bland dessa kontinuummodeller kan nämnas ABAQUS, ADINA och HNFEMP. Diskontinuiteter som sprickor och förkastningar fördelas här ut på hela bergmassan. En alternativ metod är UDEC där berget betraktas som ett diskontinuum, se vidare avsnitt 6.3.2.6. Preliminära modeller för temperaturlast i UDEC föreligger.

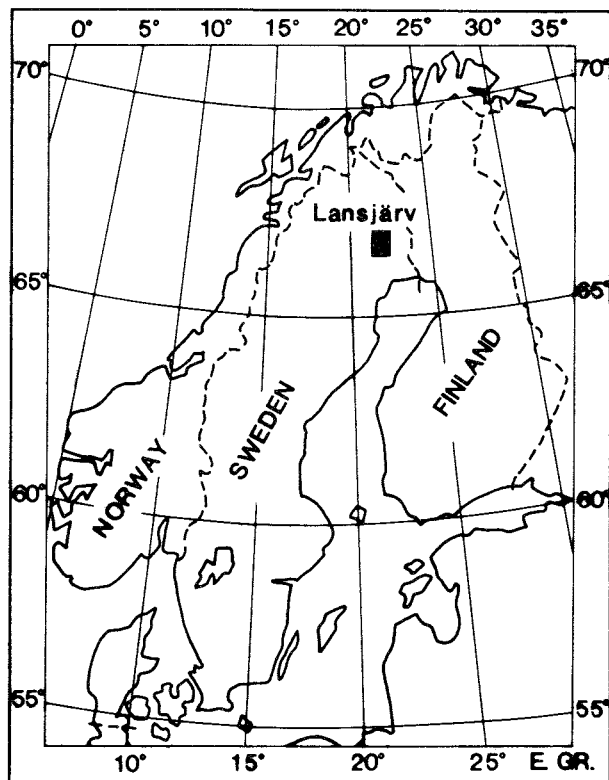
6.3.2.4 Postglaciala rörelser

1986 påbörjades ett omfattande forskningsprogram av de förmodade postglaciala förkastningarna i Lansjärvsområdet. Lansjärv ligger ca 150 km norr om Luleå. Målen för studierna i Lansjärv var att:

- belysa de mekanismer som har orsakat nuvarande språnghöjder,
- klarlägga omfattningen av eventuellt yngre sprickbildning,
- klarlägga omfattningen av eventuella pågående rörelser.

Undersökningen inleddes med en tektonisk analys av ett ca 150 × 200 km stort område runt Lansjärv, se Figur 6-4, baserad på geofysiska mätresultat.

Genom denna analys kunde tre regionala förkastningssystem lokaliseras — två brantstående med nordvästlig respektive nordlig utsträckning — och ett tredje



Figur 6-4 Lansjärvsområdet

med strykning i NNO och flackt stupande mot OSO. De postglaciala förkastningarna i området ingår i detta förkastningsmönster och bedöms huvudsakligen ha reaktiverat äldre flackt stupande zoner /6-4/. Strukturgeologiska fältstudier har i första hand syftat till att undersöka de geologiska deformationsstrukturernas kinematik och sentida dynamik som de framträder i den blottade berggrunden i och i närheten av förmodade postglaciala förkastningar — PGF (Lansjärv och Pärvie) och i anslutning till de geofysiskt indikerade lineamenten som stryker i N och NV. Kinematiska argument talar för att de NNO- och NO-ligt strykande skjuvzonerna, vilka reaktiverades i samband med bildningen av de postglaciala förkastningarna, endast utgör de mest tydliga tecknen på en mer allmän postglacial reaktiveringsprocess /6-75/.

Kvartärgeologi

Genom grävningar tvärs över de ca 20 m höga och 50 km långa NNO-ligt orienterade postglaciala förkastningsbranterna i Lansjärvsområdet har det varit möjligt att datera förkastningsrörelserna relativt till den kvartära stratigrafien /6-76/. De postglaciala förkastningarna bildades i ett sammanhang kort efter isavsmältningen för ca 9 000 år sedan och av förkastningarna kan sättas i samband med jordbävningar av storleken M_L 6.5-7.0 eller större att döma av förkastningarnas dimensioner och jordskred inom regionen. Förkastningarna bedöms vidare vara reversa och stupa 40—50° eller brantare.

Seismiska nät

Ett permanent seismiskt nät i FOAs regi har under åren 1987-1989 registrerat mer än 90 jordskalv, med signaler från tre eller flera stationer, i norra delen av Norrbotten. Skalvens magnitud ligger mellan M_L 0.1-3.6 och fokaldjupen inom 5-15 km. Den dominerande förkastningsmekanismen tycks vara strike-slip-rörelser men normala och reversa förkastningsrörelser är också vanliga. De två största registrerade skalven tolkas som reversa förkastningar. Detta styrker uppfattningen att den nuvarande tektoniska aktiviteten är av likartad karaktär som den aktivitet som byggde upp de reversa spänningar vilka utlöstes i samband med isavsmältningen i Lansjärvsområdet /6-65/. Resultaten talar också för att det är de horisontella plattrörelserna och inte landhöjningen som är den primära orsaken till den seismiska aktiviteten i norra Sverige. Under sommarhalvåren 1987 och 1988 har ett mobilt seismiskt nät, opererat av Seismologiska avdelningen i Uppsala och bestående av sex stationer, varit utplacerat i Lansjärvsområdet. Detta nät kan registrera svaga ytliga skalv och har en noggrannhet för epicenterbestämning som bedöms vara inom ± 100 m. Det utgör därför ett bra komplement till det permanenta stationsnätet. Under 1987 registrerades med det mobila nätet mer än 20 jordskalv inom ett avstånd av 40 km från mätstationerna. Nio av dessa har kunnat lokaliseras mera exakt och för två skalv har fokaldjup på 8 respektive 9 km kunnat beräknas. Flera av skalven har lokaliserats öster om de postglaciala förkastningarna. Under sommaren 1988 registrerades ca 30 skalv i Lansjärvsområdet. 18 av skalven har kunnat lokaliseras närmare och för 6 av dessa finns beräkningar som anger fokaldjup mellan 5-12 km. Någon entydig korrelation föreligger inte mellan skalven och de postglaciala strukturerna. En del skalv kan snarare relateras till en äldre förkastning som stryker i närmast rät vinkel mot den postglaciala huvudriktningen. För samtliga registrerade skalv under de två åren gäller att magnituderna i några fall uppgår till max M_L 2.4 /6-77/. Flertalet skalv har avsevärt lägre magnitud.

Borrhålsundersökningar

Med ledning av tektoniska och geofysiska mätresultat har ett antal borrhål ansatts ca 5 km norr om Lansjärv inom någon kilometers avstånd från en genom grävning lokaliserad postglacial förkastning (PGF). Syftet med borrhningen var närmast att undersöka hurvida bergmassan, i omedelbar anslutning till en förmodad PGF, uppvisar avvikande förhållanden främst avseende bergspänningar, hydrogeologi, kemi och sprickmineral jämfört med urberg i övriga delar av Sverige. Enligt den geologisk tektoniska modellen skulle tre mot öster flackt stupande sprickzoner genomborras inom ett djup av 100—200 m från markytan. Ett närmast vertikalt kärnborrhål uppvisar i sin övre del, ned till ca 250 m, en mycket stor sprickfrekvens. Under denna nivå är sprickfrekvensen normal för de granitiska bergarter som dominerar i borrhålet. Mindre inslag av amfibolit, mylonit och pegmatit noteras också. Speciellt inom avsnittet 110—265 m finns flera krossade och

ibland leromvandlade zoner. Ett ras på ca 148 m djup medförde att borrhålet fick förses med casing ned till 152 m djup. I syfte att lokalisera dessa zoner ansattes två hammarborrhål ca 400 m väster om kärnborrhålet i riktning mot den framgrävda postglaciala zonen. I båda dessa borrhål fastnade borrhstången i krosszoner på ca 90 m djup.

Grundvattnet i kärnborrhålet har provtagits och analyserats på 150 och 237 m djup. Sammanställningen på vattnet från de båda nivåerna var i stort identiska med låg koncentration av lösta ämnen vilket överensstämmer med erfarenheter från andra delar av Norrbottens urberg t ex Kamlunge.

Bergspänningsmätningar genom hydraulisk spräckning har utförts i kärnborrhålet på 27 olika nivåer. Tjuugo mätningar på nivån 300—500 m gav användbara resultat. Resultaten visar extremt låga värden för minsta horisontalspänningen jämfört med mätningar från övriga delar av Sverige. Maximala horisontalspänningen roterar från NV-SO till ONO-VSV inom ett djupintervall på ca 200 m.

Mineralogiska och geokemiska studier av sprickmineral från borrhkärnan har utförts i ett projekt i samverkan med SKI. Provtagningen av kärnan koncentrerades till krosszonerna inom avsnittet ca 140—150 m samt ett antal sprickzoner som antogs vara vattenförande. Proverna har undersökt med hjälp av INA- och röntgendiffraktionsanalys samt genom mikroskoping av tunnslip. Resultaten talar för att en omfattande hydrotermal aktivitet troligen kombinerad med cirkulation av hydrotermala lösningar. Denna har orsakat bildning av hematit, kvarts, epidot, zeoliter och i en sista fas kalcit följt av Fe-oxyhydroxider. Senare cirkulation av lågtemperaturgrundvatten har medfört omfördelning av element och mineral som t ex upplösning av kalcit och utlösning av U och lätta, sällsynta jordartsmetaller i övre delen av borrhålet följt av sorption av dessa element på Fe-oxyhydroxidfaser på större djup. Sammanfattningsvis kan sägas att det finns tecken på intensiv hydrotermal omvandling under oxiderande förhållanden i samband med intensiv sprickbildning framför allt i de övre 300 m av borrhkärnan.

De geohydrologiska undersökningarna har omfattat vatteninjektionstester i kärnborrhålet, observationer av grundvattnets trycknivåer i kärnborrhål samt sammanställning av en karta över grundvattennivåerna inom området. Numerisk modellering har dessutom utförts för att undersöka i vilken utsträckning uppmätta hydrogeologiska data — kan förklaras av den nu föreliggande geologiska tolkningen för området. Den hydrauliska konduktiviteten i kärnborrhålet är störst, mer än 10^{-6} m/s, i den övre cirka 200 m djupa delen av borrhålet där sprickfrekvensen är stor. Under denna nivå är konduktiviteten övervägande lägre än 10^{-8} m/s utom i ett fåtal tremeterssektioner som sammanfaller med mindre sprick-krosszoner. Någon helt entydig korrelation mellan hydraulisk konduktivitet och sprickfrekvens (bergartstyp) föreligger dock inte. Vid en jämförelse mellan kärnborrhålet i Lansjärv (under 200 m djup), och ett stort antal borrhål som tidigare utförts i samband med KBS-3 undersökningar, finner man att förhållandena ur konduktivitetssynpunkt är tämligen likartade. Numerisk grundvattenmodelle-

ring, av översiktlig karaktär, har utförts i syfte att belysa vilken betydelse sprickzoners orientering har på grundvattenförhållanden. I Lansjärv är det de låga grundvattentrycken i borrhålen som behöver förklaras. Beräkningsresultaten visar att en brantstående postglacial sprickzon på ett enkelt sätt kan förklara erhållna hydrauliska mätningar, medan en flackt liggande sprickzon, enligt den tolkningsmodell som låg till grund för borrhålsutsättningen, ger sämre överensstämmelse. Alternativt finns ytterligare flacka zoner på större djup.

Geofysik och tektonik

Forskargruppen, som under 1989 kommer att publicera resultaten av de olika delobjekten i en gemensam slutrapport /6-17/ har sammanställt bl a följande allmänna slutsatser:

Allmänna slutsatser

1. Eftersom flertalet av de sprickor som kan iakttagas i de grävda profilerna tvärs över förmodade PGF är kraftigt kemiskt omvandlade kan man förutsätta att dessa är av prekvarterär ålder. Liknande iakttagelser kan göras i den övre, cirka 300 meter långa delen av borrhårnan. Stora delar av de postglaciala förkastningarna sammanfaller dessutom med magnetiskt indikerade oxidationszoner. Indikation på eventuell nybildning av sprickor i samband med postglaciala rörelser har iakttagits endast på en framgrävd bergyta i omedelbar anslutning till en PGF. De postglaciala rörelserna i Lansjärv anses därför i huvudsak ha utlösts genom reaktivering av redan existerande sprickor och förkastningar.
2. De postglaciala förkastningarnas mönster och kinematik har inte den radiella eller tangentiella utsträckning som är att vänta på grund av postglacial "uplift". Snarare motsvarar förkastningarnas utsträckning effekterna av platttektoniska rörelser.
3. De postglaciala strukturerna i norra Fennoskandia utgör framträdande tektoniska drag som bildats i sen tid i en berggrund som karakteriseras av ett relativt stort antal regionala skjuvzoner med orientering i NV-SO och N-S. Reliefen i området är i allmänhet låg och den nuvarande landhöjningen relativt stor.
4. Orienteringen av äldre svaghetszoner i norra Fennoskandia gynnar uppkomsten av PGF i form av över-skjutningar och reversa förkastningar.
5. Reaktiveringen av PGF i Lansjärv har skett genom tektoniska rörelser som möjligen utlösts i samband med isavsmältningen.
6. Den hydrauliska konduktiviteten i kärnborrhålet i Lansjärv avviker inte signifikant från de förhållanden som uppmätts i ett flertal andra borrhål i svenskt urberg.
7. Det bedöms att rörelsezoner av den mäktighet som studerats kan undvikas vid försvarsutformning. Även om zoner inte lokaliseras i yt- och borrhålsun-

dersökningar kan de senare lokaliseras vid detaljundersökningar och försvarsutbyggnad. Trots det mycket dramatiska skeendet då PGF bildades vid Lansjärv är inte den hydrauliska konduktiviteten eller grundvattenkemin på typiska försvarsnivåer på något sätt anmärkningsvärd. Det har dock inte varit möjligt att specifikt skilja ut effekterna från den sista istiden för djup större än 300 m eftersom förhållandena som mätts är resultat av de ackumulerade störningar som skett i berget under många hundra miljoner år och ett flertal glaciationer.

6.3.2.5 Modellering av bergmassan

Bergmassans mekaniska egenskaper — hållfasthet och deformationer — kan i princip simuleras med kontinuerliga eller diskontinuerliga modeller.

Diskontinuerliga modeller av bergmassans mekaniska egenskaper innebär att diskontinuiteter med kända eller antagna parametrar införs i modellerna och att mellanliggande block behandlas som fullständigt rigida eller elastiska material. Distinkta elementmetoden är en av de metoder som används för att bestämma om bergmassan brister för en given påförd belastning eller för att beräkna de förskjutningar som ackumulerats när systemet slutligen uppnår ett stabilt tillstånd. Som underlag för modellering av istider har två datorprogram prövats mot fysiska modellexperiment.

Vid Colorado School of Mines experimentgruva i Idaho Springs har man prövat ett bergblock av granitisk gnejs med kantlängden $2 \times 2 \times 2$ m, CSM-blocket. Blocket belastades en- och tvåaxligt till något mer än 5 MPa med hjälp av hydrauliska tryckplattor. Förskjutningar mellan givna fixpunkter på ytan, inne i blocket och tvärs över hela blocket samt bergspänningarna har registrerats för olika belastningsfall. De omfattande primärresultaten från blockförsöken har sammanställts och utvärderats för att användas i arbetet med prövningen av programmen HNFEMP och MUDEC. HNFEMP är en finit elementmetod som bygger på att berget beskrivs som ett kontinuum. MUDEC är en finit differenskod som beskriver berget som ett diskontinuum.

HNFEMP

De beräknade deformationernas magnitud och riktning mellan olika punkter i blocket samt för hela bergmassan i blocket visar på en mycket god överensstämmelse med uppmätta förskjutningar i blocktesten för de mest sannolika sprickstyvheter.

Vid modellering med kontinuerliga modeller erhålls spänningar i blocket som står i direkt proportion till anbringade belastningar. Huvudspänningarnas riktning och medelvärde på uppmätta spänningar i blocket har simulerats på ett tillfredsställande sätt i modellarbetet. /6-78/

MUDEC

Vid prövning av den distinkta elementmetoden MUDEC mot CSM-blocket har antagits att blocket består av fyra mindre block som omges av diskreta sprickor — en förenkling /6-79/.

När belastningarna påförs blocket förflyttas och roterar de enskilda bergblocken. Deformationerna kommer därvid att variera från punkt till punkt i systemet, men på det hela taget fås riktningar och magnituder som faller inom uppmätta värden för CSM-blocket. Särskilt god överensstämmelse har uppnåtts vad gäller skjuvdeformationerna.

Modellering av istid

Efter prövning har koderna HNFEMP och MUDEC tillämpats på studier av stora bergmassors mekaniska respons till följd av nedisning, landisens flytrörelse samt isavsmältning. En tvådimensionell sektion av ett 4×4 km stort avsnitt av en bergmassa som innehåller en eller två förkastningsgrupper har belastats med bergspänningar av sådan magnitud som kan förväntas råda i fennoskandisk berggrund.

Modelleringen är av inledande karaktär /6-17/. Det föreligger svårigheter att göra korrekta uppskattningar av förkastningarnas mekaniska egenskaper. Vidare är samtliga sprickor kontinuerliga, vilket innebär att modellerna fungerar som ett "sockerbitspaket".

I de fall samma ingångsparametrar använts för förkastningar och intakt berg har god överensstämmelse uppnåtts i resultaten med de bägge modelleringskoderna.

Under en belastningscykel utsätts bergmassan för betydande belastningsändringar som i sin tur resulterar i permanenta deformationer. Överytan hos den 4 km djupa bergmassan i modellen pressas ner ca 4 m till följd av isbelastningen. I modellerna är botten låst för rörelser i vertikal riktning medan jordskorpan i verkligheten vilar på en plastisk övre mantel. I fallet med två korsande förkastningsgrupper med avstånden 200 respektive 500 m mellan förkastningarna sker en differentiell skjuvdeformation mellan blocken på storleksordningen 4—5 cm i fallet med styva förkastningar och linjär MUDEC-modellering. Deformationer av denna storleksordning gäller också ca 500 m under markytan och dessa kan med stor sannolikhet förväntas ändra bergmassans hydrauliska egenskaper.

Belastningen av 3 km is på modellens överyta innebär en ökning av vertikalspänningen med ca 25 MPa på 500 m djup. Efter isavsmältningen återgår spänningarna med små avvikelser till initialtillståndet, dvs det som bestäms av rådande bergspänningar. Spänningstillskottet till följd av isbelastningen måste superponeras till bergspänningarna vid designarbetet för ett slutförvar.

6.3.2.6 Erfarenheter av jordskalv

I FoU-program 86 redovisades planer på att sammanställa befintlig dokumentation för hur undermarksanläggningar, gruvor och brunnar påverkats av seismiska händelser. Ett samarbete inleddes med US DOE. Pga ändrade förutsättningar i det amerikanska avfallsprogrammet har den planerade bilaterala studien getts en annan inriktning. SKB har nu direkt kontakt med de huvudkonsulter som ansvarar för den tektoniska beskrivningen av Yucca Mountain.

SKB driver även ett projekt som syftar till att sammanställa seismiska händelser där undermarksanlägg-

ningar, gruvor och borrhål påverkats. Geohydrologiska, grundvattenkemiska och mekaniska förändringar är av speciellt intresse /6-80/. Vad avser mekanisk påverkan har inga skador rapporterats för skalv som ger markaccelerationer under 0.2 g. SKB har även genom studier till Japan tagit del av den samlade japanska dokumentationen. Utvärdering av dessa resultat ingår i /6-80/. Det visas bl a, som väntat, att intensitet för jordskalv är väsentligt lägre under marken än på markytan.

Det finns ingen erfarenhet av att tunnlar har kollapsat totalt genom jordbävning. Mindre skador har rapporterats om en förkastning skär tunneln och mycket starka jordbävningar sker inom någon kilometer från tunneln.

Det finns få observationer och publicerade data om förändringar i geohydrologiska förhållanden, men inflöden till berganläggningar har för några händelser rapporterats öka 40—300%.

6.3.2.7 Studier i sydöstra Sverige

Sydöstra delen av Sverige, med en berggrund som domineras av ca 1700—1800 miljoner år gamla Smålandsgraniter med tillhörande vulkaniter, förefaller att vara den mest stabila delen av Sverige. Denna slutsats baseras på det faktum att det prekambrika peneplanet endast visar tecken på lokala mindre förskjutningar såväl där det är täckt av kambro-siluriska sediment som där den prekambrika reliefen är bevarad. Man kan vidare konstatera från befintlig dokumentation att den seismiska aktiviteten är ytterst begränsad. Sydöstra Sverige förefaller alltså att utgöra ett avgränsat område som i väster begränsas av en betydande tektonisk zon med regional utsträckning — Protoginzonen.

Protoginzonen

Protoginzonen har sin utsträckning från Skåne norrut till Vättern och in genom Dalsland. Olika förkastningar grenar ut från huvudzonen mot NNO t ex genom Almesåkraområdet och Vänern. SKB undersöker spår av olika förkastningsrörelser längs Protoginzonen. Förskjutningar som har ägt rum under tidsperioden minst 1000 miljoner år (Ma) tillbaka kan påvisas. Yngre spröda strukturer i den gamla kristallina berggrunden är svårare att datera men en del strukturer omger Vätternsänkan (ca 850—650 Ma) och utgör bevis för aktiva förkastningar. Några av förkastningarna skär genom de yngsta bergarterna i Visingsöformationen och kan sättas i samband med de sprickzoner som orsakar förskjutningar i de kambro-siluriska bergarterna i Östergötland. Förkastningar har påvisats i kambrika lägen i närheten av Omberg. Andra förkastningar är permiska eller yngre (290 Ma) vilket påvisas genom störningar av diabaserna i Västgötaberget. Även om Protoginzonen tycks ha haft liten påverkan på de yngre sedimentära lagren i Skåne, har den tydligt varit aktiv betydligt senare. En stor del av den seismiska aktiviteten — som är historiskt noterad har varit koncentrerad till västra kanten av zonen. Lokala tecken på förskjutningar i kvartära avlagringar förekommer.

Seismiska nät

SKB har under perioden 1986-1988 finansierat ett seismiskt nät med fyra stationer i sydöstra Sverige. Nätet har installerats och drivits av FOA. I det redovisade analysarbetet av registrerade skalv har även ingått data från ytterligare ett antal stationer som drivs av FOA i västra och centrala Sverige /6-64/. Under tredje kvartalet 1988, det sista som nätverket var i drift, registrerades det första jordskalvet inom den seismiskt tysta småländska ostkusten. Det var ett magnitud 1.0 skalv som inträffade på 16—17 km djup cirka 20 km söder om Oskarshamn. Analysen av skalvet visar på relativt högt statistiskt spänningsfall med tanke på skalvets ringa storlek. Förskjutningen i skalvförkastningen uppskattas till cirka 1 mm. Mest sannolika skalvmekanismen är "strike-slip" med horisontella kompressionsriktningen NV-SO. De två möjliga förkastningsplanen har strykningarna N-S eller O-V, planen är nära vertikala.

Geologisk-tektoniska studier i Simpevarpsområdet

I samband med förundersökningarna för berglaboratoriet i Simpevarpsregionen har geologisk-tektonisk analys genomförts såväl i regional som lokal skala inom ett stort område mellan Oskarshamn och Västervik /6-2/. Den tektoniska analysen har baserats på ett omfattande underlag av flyggeofysiska mätningar, satellitbilder och lineamentsstudier samt petrografisk och strukturgeologisk fältkartering. Magnetiska flygmätningar i kombination med gravimetriska markmätningar påvisar ett antal cirkulära eller semicirkulära strukturer vilka tolkas som diapirer av yngre (anorogena) graniter i den stora massan av Smålandsgraniter i olika varianter som utgör huvudbergart i Simpevarpsområdet. De cirkulära strukturerna, speciellt Götemarmassivet, framträder tydligt även på satellitbilder. Lineamentsstudier av reliefkartor och strukturanalys av olika digitala modeller har tillsammans med data från de flyggeofysiska mätningarna, magnetiska och elektriska, gett en god bild av det storregionala tektoniska mönstret. Detta gäller främst de brantstående större sprickzonerna som enligt denna tolkning uppträder i två närmast ortogonala system — N-S, O-V respektive NV-SO och NO-SV. Försök att lokalisera eventuella subhorisontella zoner som inom regionen i stort påvisats av Nordenskjöld /6-81/ och mera lokalt Gustafson et al /6-3/ har främst gjorts med hjälp av reflektionsseismik. Lineamentsstudier i mera lokal skala visar att ovan nämnda regionala tektoniska mönster går igen i det lokala mönstret. Detta bestyrks ytterligare av andra undersökningar i området /6-3/. Sprickzoner som stryker N-S och NO-SV framhålls som mest tänkbara vattenförande zoner. Även de subhorisontella zonerna bör beaktas i detta sammanhang. Enligt /6-3/ sammanfaller de äldsta strukturerna i Simpevarpsområdet med Småland-Värmland batolitens regionala mönster. De basiska gångarna och de i borrhålen påträffade diorit-gabbrobergarterna på Åspö har bildats genom kontinuerliga "magmamingling- och magma-mixingprocesser". De anorogena graniternas intrusion har haft liten tektonisk effekt på omgivande äldre berggrund.

6.3.3 Forskningsprogram 1990-1995

6.3.3.1 Kunskapsöversikt av istider och landhöjning

SKB redovisade i sitt forskningsprogram FOU-program 86 att en djupare analys av istider och landhöjning kan vara aktuell. Detta förslag stöddes av ett flertal remissinstanser, både nationella och internationella.

För att på bästa sätt sammanställa kunskap och utvärdera vilken betydelse istider och landhöjning kan ha för analysen av förvarets säkerhet har TVO i Finland och SKB beslutat att genomföra delar av denna analys gemensamt. Vidare har en mer generell studie i nordiskt samarbete föreslagits.

Målen för TVOs och SKBs översikt är att:

- beskriva förhållandena före en istid och hur isen växer till,
- beskriva hur förhållanden ser ut under isen (grundvattenrörelser och grundvattenkemi) och jordskorpans nedpressning,
- beskriva avsmältningförloppet,
- beskriva landhöjningen.

Av särskilt intresse är att belysa om en istid föregås av permafrost till stort djup, om grundvattenkemin dramatiskt förändras under en glaciär, om lättlösliga sprickmineral kan lösas ut och ge förhöjd grundvattenomsättning på förvarsnivån samt om isavsmältning leder till låga effektivspänningar på stort djup i berget och stora rörelser i berggrunden.

Arbetet sker stegvis. Det bedöms att huvuddelen är avslutad till 1992. Utvärderingen kan leda till att specifika förslag för kompletterande datainsamling upprättas.

6.3.3.2 Fördjupad tektonisk analys

I remisserna till FoU-program 86 påpekade ett flertal remissinstanser på betydelsen av tektonisk analys. De planerade insatserna kring Lansjärv som redovisats ovan, bedömdes som föredömliga, men några remissinstanser ställde sig tveksamma till om det från dessa undersökningar var möjligt att upprätta en undersökningsmetodik för att identifiera neotektoniska fenomen även inom andra områden som inte uppvisar så tydliga spår som i Lansjärv. Flera remissinstanser pekade även på betydelsen att förstå de storskaliga strukturerna i ett regionalt sammanhang.

SKB bedömer det också lämpligt att genomföra en fördjupad tektonisk analys i det regionala område som omger det planerade underjordiska berglaboratoriet vid Åspö. Genom de tidigare regionala och lokala undersökningarna, /6-2, 3/ finns ett högvärdigt datamaterial att utgå ifrån.

På samma sätt som för Lansjärvsundersökningarna är det angeläget att beskriva förekomst av eventuell yngre sprickbildningar, att beskriva pågående processer i området, att klargöra förekomst av pågående rörelser att lokalisera potentiella rörelsezoner.

Värdefulla bidrag till regional förståelse kan redan nu hämtas från /6-82/. Det förutses att Åspö karteras

med avseende på eventuella postglaciala sprickor enligt metodik som indikerats av Mörner /6-72/.

Den tektoniska analys kring Simpevarpsområdet som genomförts med digitala höjddata som grund, /6-70/, kan bli utgångspunkten för att placera ut geodetiskt nät för långtidsövervakning av rörelser. Data från finska och svenska geodetiska mätningar som påvisar horisontella kryprörelser i Baltiska skölden kommer att sammanställas. Ett sådant nät bör kompletteras med gasanalys över en profil /6-68/.

Seismiska signaler är av värde för en tektonisk tolkning. Det förutses att sådana data kan hämtas från ett svenskt seismiskt nät, se vidare avsnitt 6.3.3.4.

Det bedöms mycket värdefullt att understödja den tektoniska förståelsen med numerisk modellering på motsvarande sätt som redovisats ovan i avsnitt 6.3.2.6, där även effekter av istider ingår.

Med hänsyn till att Lansjärvsprojektet ännu inte är fullständigt avslutat, har det bedömts riktigt att genomföra planeringen av insatserna för den fördjupade tektoniska analysen under 1990, så att ett väl samlat och målinriktat projekt kan påbörjas under 1991. I ett sådant projekt är det även lämpligt att utforma riktlinjer för hur ett förvar ska utformas mht tänkbara framtida rörelser.

6.3.3.3 Avslutning av Lansjärvsprojektet

En samlad redovisning av Lansjärvsprojektet är genomförd. Under projektets gång har det inte varit möjligt att lösa alla frågeställningar till fullo.

SKB planerar därför kompletterande arbeten under 1990. En ny provgrop planeras med längre utsträckning för att se indikationer på ny sprickbildning i anslutning till zonen, korta borrhål borras i zonen hängvägg för att avgöra stupningen och ett relativt kort kärnborrhål borras för att undersöka om den hydrotermala omvandlingen är typisk för området.

Arbetena vid Lansjärv planeras även bli redovisade vid ett (internationellt) seminarium.

6.3.3.4 Drift och analys av seismiska data

SKB förutser att en huvudman utses för driften av ett effektivt svenskt seismiskt nät. I den mån ett sådant etableras kommer SKB att periodvis stödja analys av de data som registreras.

Om inget svenskt nät etableras förutses att SKB etablerar ett nät kring den plats som blir platsen för slutförvaret. Ett sådant nät kommer dock i drift tidigast om 10 år.

6.3.3.5 Internationella projekt

Det pågår för närvarande ett stort antal mycket stora internationella projekt inom det geovetenskapliga området, t ex det internationella litosfärsprojektet, ILP (International Lithosphere Project).

Dokumentationen är omfattande och växer snabbt. Den kunskap som växer fram är relevant för förståelsen av de pågående geodynamiska processerna i Baltiska skölden, för ökad kunskap om istider och om havsytans variationer i historisk tid.

SKB planerar att utse en observatör som regelbundet rapporterar om den specifika kunskap inom internationella projektet som är till nytta för SKBs geovetenskapliga program. Här bör ingå att rapportera om intressanta nya skalv, som t ex de stora jordskalv, magnitud M_s 6.3, 6.4, 6.7 som inträffat i ett lågseismiskt område /6-83/.

SKB har samlat in visst datamaterial om effekter av jordskalv mm på undermarksanläggningar som föreligger för Japan. Detta material kommer att ingå i den kompilering som pågår /6-80/. Det förutses att sammanställningar av denna typ sker i internationell samverkan även i fortsättningen.

SKB kommer även att delta i ISRM's (International Society of Rock Mechanics) Commission on Tectonic Stability and Site Selection.

7 KEMI

7.1 GRUNDVATTENKEMI OCH GEOKEMI

7.1.1 Mål för FoU-verksamheten

De grundvattenkemiska undersökningarna syftar till att:

- etablera en tillräcklig kunskap om de kemiska egenskaper hos grundvatten och mineral som bestämmer kapselupplösning, buffertstabilitet, bränsleupplösning och radionuklidmigration,
- bestämma vilka kemiska förändringar i den naturliga miljön som förvaret och eventuellt inströmmande vatten med annan sammansättning kan åstadkomma,
- bekräfta den geohydrologiska modellen för vattenströmning i ett förvarsområde.

7.1.2 Nuvarande kunskapsläge

GRUNDVATTENTYPER

På stort djup i berggrunden (djupare än 100 m) förekommer två olika huvudtyper av vatten, sött och salt. Dessa vatten har antingen helt olika ursprung eller helt olika uppehållstider i berggrunden. Det är dock svårt att å priori avgöra om uppehållstiden eller ursprunget är avgörande. I många fall kan man tänka sig att de salta vattnen dels har ett annat ursprung än det söta men också en mycket lång uppehållstid.

Sött vatten

Det söta grundvattnet har sitt ursprung i regn och snö som i form av ytvatten tränger ned i berget. Då vattnet passerar genom jordlagret tar det upp koldioxid som produceras vid de biologiska processerna som sker i detta skikt. Vattnet blir då surt och aggressivt. Mycket av grundvattnets efterföljande sammansättning bestäms av hur mycket koldioxid som upptas då vattnet passerar genom jordlagret /7-1/.

Då det sura vattnet kommit ned till berggrunden vidtar en kemisk vittringsprocess som kontinuerligt förändrar grundvattnets sammansättning. Det koldioxidrika vattnet angriper i första hand de lösliga kalciumhaltiga mineral som finns i spricksystemen /7-2/. Genom upplösning av kalcit ökar vattnets halt av kalcium och karbonat samtidigt som pH går upp mot neutrala värden. Man får således ett vatten som till största delen består av kalcium och karbonat med inslag av magnesium och järn. De variationer i halt som förekommer är sannolikt betingade av att koldioxidhalten har varierat /7-2, 3/.

Vid längre uppehållstider sker ett utbyte mellan kalcium och natrium. Samtidigt som upplösningen av de svårslösliga natriummineralen tilltar ökar pH. Det-

ta gör att en del av den kalcit som tidigare lösts upp kommer att falla ut igen. Ofta sker en samtidig upplösning av kalcium ur andra kalciumrika mineral vilket gör att kalciumhalten förblir konstant medan karbonathalten sjunker. Dessa söta djupa grundvatten innehåller likartade halter av natrium och kalcium och innehåller förutom karbonat även en del klorid och sulfat samt låga halter av övriga anjoner och katjoner. pH-värdet ligger kring 8.

Vid längre uppehållstider tilltar så småningom pH och kloridhalten medan karbonathalten sjunker. En fortsatt process i den riktningen leder till salt vatten /7-2/.

Salt vatten

Det salta grundvattnet kan ha två olika ursprung. Antingen är det ett havsvatten som trängt ned i berget vid något tillfälle eller så är det ursprungligen ett sött vatten som under en mycket lång uppehållstid i berget genom olika processer blivit salt. Vatten av metamorft ursprung har tills vidare inte påträffats.

Under perioden efter senaste istid har Östersjön genomgått olika faser från Baltiska issjön till Yoldiahavet 8000 f Kr, Ansylussjön 7000 f Kr, Litorinahavet 5000 f.kr som senare utvecklats till våra dagars Östersjön. Både Yoldiahavet och Litorinahavet var bräckvattenhav. Salthalten i Litorinahavet anses som högst ha varit ca 3 ggr högre än i Östersjön medan Yoldiahavet hade en lägre salthalt /7-4/. Man kan förmoda att de inbördes jonförhållandena i samtliga fall varit de samma. Grundvatten med en salthalt som överstiger Östersjöns kan således härröra från Litorinahavet eller ha sitt ursprung i tidpunkter som ligger före den senaste inlandsisens avsmältning.

På platser som ligger nedanför den linje till vilken havet nått efter senaste istiden kan man anta att salt vatten har marint ursprung. På övriga platser är de salta vattnen ett resultat av vatten-mineral reaktioner eller havsvatten från tiden före den senaste nedisningen. Processer som bidragit till att vattnet blivit salt kan förutom att vara rent kemiska även vara fysikaliska som då en permafrost långsamt frusit ut saltet ur vattnet.

SLUTSATSER GRUNDADE PÅ VARIATIONERNA AV SÖTT OCH SALT VATTEN

Skarpa gränser mellan salt och sött vatten förekommer sällan. Däremot sker förändringarna ofta i steg som funktion av djupet. Storleken på dessa steg är beroende av de platsspecifika förhållandena. Tabell 7-1 belyser de karakteristiska parametrarna hos de saltvatten som påträffats.

Tabell 7-1. Sammansättningen hos salta vatten som provtagits i samband med SKBs undersökningar. Alla halter är angivna i mg/l utom pH. Djup angivet i meter.

Plats	Djup	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	HCO ₃	pH
Äspö	860	3100	6	4300	70	12500	710	10	8.2
Finnsjön	439	1700	13	1600	120	5500	380	48	7.0
SFR	100	1500	20	1100	250	5000	490	90	7.5
Stripa	870	290	3	170	1	700	100	13	9.3
Fjällveden	625	300	1	40	1	470	1	16	9.0
Gideå	596	150	2	60	1	300	1	70	8.9

Äspö

Äspö är den plats av de som hittills undersökts där den mest entydiga bilden av grundvattenkemin erhållits /7-5/. Eftersom ön omges av havsvikar på alla sidor har man mycket små tryckgradienter som kan åstadkomma en vattenomsättning i berggrunden. Därför är vattnet på Äspö salt redan på relativt ringa djup. Det finns t ex ett borrhål som går ner till 100 m djup men trots detta har vatten med en kloridhalt på 5000 mg/l, alltså ca 50% högre än Östersjön.

På större djup ca 800 m är salthalten högre än vad man kan anta gällde för Litorinahavet. Det är därför troligt att detta vatten uppehållit sig i berget under mycket lång tid. Åldersbestämningar på mindre salt vatten pekar mot tiotusentals år /7-6/.

SFR och Finnsjön

I både SFR och Finnsjön har man funnit salt vatten, i SFR endast salt medan vattnet i Finnsjöområdet är både salt och sött. På båda ställena är det salta vattnet av liknande karaktär, se Tabell 7-1. Salthalten uppgår till ungefär den dubbla i jämförelse med Östersjön.

I Finnsjön sammanfaller gränsen mellan salt och sött vatten med en subhorizontell zon, se avsnitt 6.2.2.4. Detta är knappast en tillfällighet utan har sin förklaring i att detta konduktiva parti leder bort sötvatten via de tryckgradienter som ligger på uppifrån. Det är också möjligt att blandningen mellan sött och salt vatten i zonen resulterar i kalcitutfällning och tätning av sprickorna.

Både i SFR och Finnsjön tyder vattensammansättningen på att ursprunget kan vara Litorinahavets vatten. Det är emellertid omöjligt att utesluta ännu äldre vatten och att man har en blandning mellan mycket gammalt vatten, Litorinavatten och sötvatten.

Stripa

I Stripa förekommer både salt och sött vatten. Det salta Stripa vattnet har en salthalt som uppgår till endast en tiondel av Finnsjön och SFR. Stripa ligger ovanför högsta kustlinjen. Därför verkar det rimligt att anta att detta vatten inte påverkats av havsvatten efter senaste ishavssmältning. Sammansättningen är annorlunda än hos SFR Finnsjön och Äspö vattnen, framför allt har de salta Stripavattnen ett pH värde som är mycket högt, över 9 /7-2/.

Pga att Stripa gruva dränerats under så lång tid är det osannolikt att gränsen mellan sött och salt vatten bestäms av annat än de tryckförhållanden som råder

till följd av dräneringen. Det är också troligt att de forcerade vattenströmningen lett till ett blandning mellan sött och salt vatten på ett sätt som annars inte hade uppstått /7-7/.

Övriga platser

De flesta typområden som undersökts har endast uppvisat sött grundvatten. Förklaringen till detta kan ligga i att typområdena varit utpräglade inströmningsområden.

En provtagen sektion i Fjällveden och en i Gideå har gett ett vattenprov som innehåller påtagliga salthalter. Dessa vatten har vissa likheter med Stripavattnet. Samtidigt kan man konstatera att det även finns olikheter i sammansättningen. Detta kan ha sin förklaring i att geologin i Stripa skiljer sig från geologin på övriga platser.

GRUNDTVATTNETS SPECIELLA EGENSKAPER

Förutom skillnaden mellan sött och salt är grundvattnets karaktär mycket stabil. Grundvattnets kemiska egenskaper återspeglar bergets. Därför är skillnaderna mellan vatten på olika platser liten. Det är sannolikt så att de variationer som finns i första hand beror på att de hydrologiska förhållandena varierar.

Redoxförhållande

Allt djupt grundvatten i SKBs undersökningsbank är reducerande. Större delen av det lösta syre som finns i vattnet förbrukas av de biologiska processerna då vattnet tränger ner genom jordlagret eller bottensedimenten. Man kan anta att återstående syrerester reduceras av de järnhaltiga mineralen i de översta partierna av berget. Oxiderade sprickyor i det översta partiet av berget tyder på att så är fallet /7-8/.

Det koldioxidrika vattnet som förorsakar kalcitupplösning höjer också halten av järn i vattnet. Inom djupintervallet 0—100 m har man ofta provtagit vatten med järnhalter i storleksordningen 1—10 mg/l. Sannolikt är detta följd av koldioxidvittring av biotit och andra silikatmineral som innehåller järn. Allteftersom pH och sulfidhalten tilltar mot djupet minskar järnhalten. Järnsulfid står i jämvikt med grundvattnet /7-9/.

Uppmätta redoxpotentialer ligger väl samlade inom ett snävt intervall. Magnetit-hematit jämvikten och kvoten mellan två och trevärt järn i silikatmineral beskriver mycket väl Eh-pH relationen i mätningarna. Ett empirisk samband mellan pH och Eh är

$$Eh = (200 - 60 \times \text{pH}) \text{ mV}$$

Redoxkapaciteten i vattnet är liten. Däremot innehåller berget en mycket stor redoxkapacitet i form av 1—10% järn av vilket det mesta finns i tvåvärd form. Det är emellertid svårt att bedöma hur stor del av denna mängd som finns tillgänglig för reaktioner med oxidanter.

Omsättningstid

Grundvattnet har ingen entydig omsättningstid i berggrunden. Däremot kan man tala om en relativ "medelomsättningstid" där man genom sammansätt-

ningen och värden på radioaktiva isotoper kan gradera de olika vatten relativt varandra. De viktigaste parametrarna och deras innebörd kan kort beskrivas på följande sätt.

- Salt vatten med en kloridhalt som överstiger Östersjöns kan ha sitt ursprung i Litorinahavet. Det har då uppehållit sig i berggrunden ca 7000 år. I de fall att saltet härrör från reaktioner mellan berggrunden och grundvattnet är åldern mycket högre, sannolikt upp till miljontals år i sk brines. Salthalten kan tas som ett mått på den relativa åldern.
- Kol-14 dateringar ger i princip en ålder på vattnet. Halveringstiden är 5568 år och täcker således den tidsperiod som är mest intressant, ca 1000—30000 år. Det finns emellertid ett antal processer som gör att den uppmätta åldern på karbonatinnehållet i grundvattnet ger för hög ålder. Kort uttryckt innebär dessa att karbonatet i vattnet växelverkar med karbonat i berggrunden. Genom att kombinera kol-14 dateringar på både oorganiskt och organiskt kol i vattnet kan man få en klarare bild av åldersfördelningen.
- Tritium har en halveringstid på 12,26 år. Mätbara tritiumhalter tyder således på inslag av mycket ungt vatten.
- Syre-18 och deuterium visar gemensamt om vattnet har meteoriskt ursprung. Syre-18 halterna återspeglar klimatförhållandena då vattnet infiltrerat och kan på så sätt ge en antydning till när detta skett.

Genom att väga in alla dessa "åldersdata" kan man skapa sig en uppfattning om åldersfördelningen i vattnet som analyserats. Ofta är kombinationen mellan tritium och kol-14 användbar för att visa om det vatten som provtagits är representativt. Störningar förorsakade av borrningen och av borrhålet kan ofta ge en kombination av höga kol-14 åldrar tillsammans med mätbara tritiumhalter. Det finns emellertid också andra orsaker till att vatten har både tritium och hög kol-14 ålder. En samlad analys av alla data från flera provtagningpunkter i samma område är nödvändig för att man skall kunna utröna omsättningstiden.

Sprickmineral och mineraljämvikter

Analys av grundvattnet ger en entydig bild av den kemiska situationen i dagsläget. Genom att analysera de kemiska egenskaperna hos sprickfyllnadsmineral kan man få en uppfattning om stabiliteten i den bild som grundvattenkemin i dagsläget representerar. I första hand kan man komma åt variationer i redoxförhållandena /7-10/.

Förekomst av hematit och järn-oxy-hydroxid i konduktiva spricksystem även på stora djup tyder på att syresatt vatten har funnits på dessa djup. Detta har skett under hydrotermala förhållande och resulterat i hematitbildning. Under slutfasen av en sådan händelse kan oxy-hydroxiderna ha bildats. Det finns inga belägg för att syresatt vatten passerat i spricksystemen under lågtemperaturförhållanden.

Förekomsten och fördelningen av kalcitläkta sprickor ger en god möjlighet att kontrollera modellerna för grundvattenrörelser.

Eftersom det koldioxidrika vattnet löser upp kalcit i

det översta partiet av berget ser man en påtagligt lägre frekvens av kalcitläkta sprickor till det djup där kalcitupplösningen upphör. På de platser där vattenomsättningen är mycket låg kan man följaktligen inte konstatera någon minskning i kalcitfrekvensen. Detta är fallet på Äspö.

GEOKEMISKA MODELLBERÄKNINGAR

Naturliga geokemiska förhållanden

Jämviktmodelleringar mellan grundvatten och olika mineral visar hur stabila de undersökta grundvattnen är. Eftersom de studerade jämviktssystemen kräver olika lång tid att utbildas kan man utgående från vilka mineral som står i jämvikt med vattensammansättningen få ett relativt mått på den tid under vilken vattnet och mineralen stått i kontakt med varandra.

För modelleringarna används i första hand PHREEQE och EQ 3/6 programmen. PHREEQE koden är relativt enkel att använda och lämpar sig väl för att studera tänkbara förlopp i grundvatten/mineralsamverkan. Samtliga grundvattendata som erhålls kontrolleras med en lösbarhet för de viktigaste mineralerna t ex kalcit, gips, kvarts, hematit, magnetit, götit och pyrit /7-11, 7-6/. För detaljerade studier av grundvatten kemiska processer är EQ3/6 koderna mer lämpade /7-12, 13/.

Förhållanden i närområdet

För att förutse de kemiska förändringar som kan uppkomma i närområdet genomförs geokemiska modellberäkningar i samarbete med Strasbourg Universitetet. Tre system behandlas; bentonitlera/grundvatten, bentonitlera / koppar / kopparmineral / grundvatten och betydelsen av syror och baser för bentonitleran.

Beräkningar har genomförts för att bestämma stabilitetsområdet för smektiter och illiter som en funktion av temperatur och kemisk sammansättning /7-14/.

Effekten av en uppvärmning av berget till 150 °C och effekten av höga pH pga betong i förvaret har likaså modellberäknats /7-15/. Enbart uppvärmning ökar inte porositeten men uppvärmning i samband med högt pH från betong skulle möjligen kunna åstadkomma detta. Resultaten har bl a använts vid bedömningen av WP-Cave förvarets långtidsstabilitet /7-15/.

7.1.3 Forskningsprogram 1990-1995

Det fortsatta forskningsprogrammet kommer under perioden 1990-1992 att huvudsakligen utföras inom ramen för berglaboratoriet. Därefter kommer även platsundersökningar att ingå i verksamheten under perioden 1993-1995. Platsundersökningarna kommer att kunna utföras på basis av erfarenheterna från berglaboratoriet.

På varje undersökningsplats krävs dels en baskartläggning av de grundvattenkemiska förhållandena och dels en fortlöpande uppföljning av eventuella förändringar i samband med undersökningarna eller en anläggningsverksamhet. En sådan uppföljning sker även vid SFR.

Hydrokemigruppen i Stripa projektet har samman-

ställt ett förslag på hur vatten och geokemiförhållanden bör undersökas /7-16/.

GRUNDVATTENTYPER

Förekomsten av sött och salt vatten kommer att studeras vid alla kommande platsundersökningar. På varje ny plats utförs grundvattenkemiska undersökningar i åtminstone två etapper, först i grunda hammarborrhål och senare i djupa kärnborrhål.

Klassificeringen av salt vatten skall detaljeras. Ett försök att differentiera pre-, syn- och post-glaciala grundvatten skall utföras i samband med säkerhetsanalysen SKB 91. Vattenkemiska data från i första hand Äspö, Finnsjön och SFR kommer att användas, men även data från övriga undersökningar.

REDOXFÖRHÅLLANDE

Redoxnivån hos de djupa grundvattnen är väl definierad och klarlagd. Däremot är redoxbuffringskapaciteten och framför allt kinetiken för de ingående reaktionerna föga kända. Under perioden 1990-1995 kommer experiment att utföras för att mäta redoxbuffringskapaciteten hos berget, i första hand empiriskt men på sikt även med inriktning på förståelse för de bakomliggande reaktionerna.

GRUNDVATTNETS OMSÄTTNINGSTID

Studier av olika stabila och radioaktiva isotoper i både grundvattnet och sprickmineral kommer att tillsammans med klassificeringen av grundvattnen utgöra de metoder som kan användas i syfte att härleda vattnets ursprung. Härvid kommer användbar dateringsteknik att tillämpas vid de fortsatta undersökningarna. Stor nytta kan dras av de omfattande studierna av dateringsteknik som gjorts av hydrokemigruppen i Stripa /7-16/.

SPRICKMINERAL

Provtagnings- och analysteknik studeras i samband med sprickmineralundersökningarna, t ex kontaminering med kol-14 från luften i kalcitproven.

Det är känt bl a från Klipperås att syrehaltigt vatten som är omättat med avseende på kalcit penetrerar de ytligare nivåerna i berggrunden. Detta resulterar i en minskad frekvens av kalcit och en ökad frekvens av rost i ytliga vattenförande sprickor. Till vilket djup denna urlakning/oxidering äger rum beror på hydrauliska gradienten i området, vattenkemin, jorddjupet, jordlagrets sammansättning m m. Allt detta påverkar alltså redoxförhållandena i sprickorna i berggrunden. Frekvensen av rost och kalcit i borrhålen ger på så sätt upplysningar om redoxkapaciteten i berggrunden.

Analys av redoxkänsliga ämnen såsom Fe(II)/Fe(III), Ce(III)/Ce(IV) och Eu(II)/Eu(III) i sprickmineral utnyttjas för tolkning av de redoxförhållanden som har rått och råder i sprickor i berggrunden.

Det fortsatta arbetet med sprickmineralundersökningar inriktas på:

— att utnyttja förekomst och fördelning av sprickmineral som kalcit, hematit, rost och pyrit för att beskriva den hydrogeokemiska miljön i ett område,

- att med hjälp av radiometriska dateringar (uranserieanalyser och C-14) belägga under vilka tidsperioder olika geokemiska processer äger rum respektive har ägt rum,
- att med hjälp av spårämnesanalyser på sprickmineral och kombinerade sprickmineral/grundvattenprover beskriva mobiliteten av ämnen som U, Th, sällsynta jordartsmetaller, Cs och Sr. Sorptionen av olika element på sprickmineralen varierar beroende på varierande vattenkemi och typ av mineral. Detta har undersökts in-situ enbart i Klipperås. Flera områden bör undersökas för att försöka validera medfällning och sorptionsstudier som utförts på laboratoriet.

GEOKEMISKA MODELLBERÄKNINGAR

Jämviktsmodeller och reaktionsmodeller kommer även fortsättningsvis att användas för att beskriva de uppmätta kemiska förhållandena i systemet berggrundvatten. Modellberäkningar av den geokemiska utvecklingen i närområdet, t ex vattensammansättning och mineralomvandling, kommer att fortsätta. En ökad användning av kopplade modeller geokemisk transport förutses.

Ett speciellt område där modellering kommer att göras gäller försurningen av nederbörden. Lågt pH hos regnvattnet kan ha större betydelse för vittringen av berget än koldioxidupptagningen.

7.2 RADIONUKLIDKEMI

7.2.1 Mål för FoU-verksamheten

De radionuklidkemiska undersökningarna har till mål att:

- mäta och sammanställa de kemiska basdata som behövs för att beskriva löslighet, oorganisk speciering och medfällning av radionuklider i och utanför förvaret,
- fastställa möjliga halter, stabilitet och mobilitet av upplösta radionuklider i form av kolloider, huminkomplex eller andra aggregat, t ex mikrober,
- beskriva radionuklidens växelverkan med berg och återfyllnadsmaterial i form av redoxreaktioner, ytsorption och diffusion,
- fastställa radiolysens omfattning och inverkan i närområdet.

Den första punkten sker till stor del i internationellt samarbete — dels för att utföra mätningarna av de lösningskemiska konstanterna och dels för att sammanställa konstanterna i en databas. Det är väsentligt att de kemiska data som skall ingå i säkerhetsanalysen har internationell acceptans, är väl dokumenterade och kvalitetssäkrade i den utsträckning som erfordras.

Egna mätningar görs där så är nödvändigt och modern datateknik används för såväl lagring av data som kemiska modellberäkningar.

Den andra punkten innefattar analys och karakterisering av de aggregat, t ex kolloider, huminämnen (humus- och fulvosyror) och mikrober, som finns i grundvattnet. Därtill kommer försök med upptag och

rörlighet av radionuklider i sådan form. Till sist ingår modellbehandling av radionuklid-speciering och transportegenskaper, så långt det är möjligt.

Den tredje punkten innebär såväl laboratorieförsök som modellstudier med inriktning att förstå den fysikalisk-kemiska processen för retention i berget och att förse transportmodellerna med fördröjningskonstanter eller submodeller för ytsorption och diffusion. Det är viktigt att visa att postulerade reaktioner mellan radionuklider och mineral, t ex reduktion, verkligen äger rum.

Beträffande den fjärde punkten så finns goda möjligheter att beräkna strålfältet utanför och inuti en avfallskapsel som funktion av tiden. Det finns också en radiolyskinetisk modell som ger möjligheter att beräkna radiolysens omfattning. Försök genomförs för att bekräfta modellens giltighet och möjliggöra mindre konservativa antaganden om konsekvenserna av radiolys.

7.2.2 Nuvarande kunskapsläge

LÖSLIGHET, SPECIERING, MEDEFÄLLNING OCH KINETIK

Radionuklidens löslighet och speciering i grundvattnet kan beskrivas med kemiska jämviktsmodeller baserade på termodynamiska konstanter. För att få fram tillräckligt bra databaser med jämviktskonstanter för de viktigaste radionukliderna görs kompletterande labo-

Tabell 7-2. En uppskattning av det allmänna kunskapsläget beträffande kemiska termodynamiska konstanter för lösta oorganiska komplex och fasta faser av viktiga element i grundvatten. En femgradig "betygsskala" har använts. Den specifika betydelsen för en säkerhetsanalys måste bedömas från fall till fall.

ÄMNE	VALENS	LIGAND ^c				
		OH ⁻	CO ₃ ²⁻	HPO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻	F ⁻
U	VI	4a	4a	1b	4	4
	V		4a			
	IV	3b	2b	3	4	4
Th	IV	3b	2b	3	4	4
Pu	III	4	4a	3	3	2
	IV	3	2a	3	3	3
	V	2	3a	0	3	1
	VI	4	4a	1	3	4
	VII	2	2	0	0	1
Np	IV	2	2a	0	3	4
	V	4	3a	1	3	2
	VI	4	3a	2	4	4
	VII	2	2a	0	0	0
	III	5	3b	3	4	4
Tc	IV	1	0	0	2	1
La	III	5a	4a	2	4	4
Ce	IV	3a	4a	3	4	2

a Mätningarna har med stöd av SKB utförts av Institutionen för oorganisk kemi, KTH, exklusivt eller i samarbete med CEA eller ISPRA.

b Arbete pågår att förbättra värdena med stöd av SKB.

c Silikater har inte inkluderats men har befunnits vara av betydelse för t ex U(VI).

ratoriemätningar såväl här som på olika håll runt om i världen. En bedömning av kunskapsläget på området redovisas i Tabell 7-2.

Laboratoriearbetet i Sverige har varit koncentrerat till uran, torium och deras föreningar med hydroxid och karbonat. Resultaten har publicerats företrädesvis i vetenskapliga tidskrifter /7-17, 18/. För aktinider som neptunium och plutonium har samarbetet med franska CEA varit betydelsefullt /7-19/. Man har där utomordentligt goda möjligheter att genomföra experiment med radioaktiva ämnen. Hydrolyskomplex av uran(IV) har studerats med laserspektroskopi (TLS) i samarbete med Ispra-laboratoriet i Varese, Italien /7-20/.

Internationellt stöder SKB de projekt för insamling och validering av termodynamiska databaser som leds av OECD/NEA (TDB) och CEC (CHEMVAL).

Arbetet med den termodynamiska databasen TDB, som leds av OECD/NEA har hunnit längst beträffande uran. En egen termodynamisk databas för uran, SKBUI /7-21, 22/ har tagits fram för SKB. Den används av det geokemiska datorprogrammet EQ3NR. Framtagningen och testningen av SKBUI har haft god användning av de urankemiska experiment som pågått en längre tid liksom den aktiva medverkan i TDB och CHEMVAL. SKBUI har validerats mot oberoende experiment /7-22/. Uppbyggnaden av en "egen" dokumenterad databas på SKB går därmed enligt planerna.

Medfällning av lantanider och aktinider med uran och betydelsen av detta fenomen för frigörelse och transport av radionuklider i närområdet har undersökts experimentellt /7-23/. Torium, lantan och barium valdes som modellsubstanser för aktinider och fissionsprodukter, tillsammans med huvudkomponenten uran. Även medfällning vid bildning av järnhydroxider och kalcit behandlades.

ORGANISKA KOMPLEX, KOLLOIDER OCH MIKROBER

Grundvattenprov från Stripa, Kamlunge och Svartboberget har analyserats på sitt innehåll av kolloidala oorganiska partiklar. Koncentrationen av partikulärt material låg i allmänhet under 0,1 mg/l. Det högsta värdet som erhöles var 0,4 mg/l. Ostörda grundvatten förväntas ha betydligt lägre halter /7-24/. Filtreringar av salta grundvatten i Forsmark och Simpevarp som senare utförts i fält med sk hollow fibre utrustning tyder på att dessa vatten har mycket låga halter av partikulärt material (betydligt lägre än 0,1 mg/l).

Bildning och stabilitet av oorganiska kolloider i grundvattnet har studerats in-situ i Fjällveden /7-3, 7-24/. Syresatt vatten pumpades ned i en vattenförande sektion på 468 meters djup i borrhål KFJ02. Detta orsakade som väntat en kraftig ökning av partiklar som innehöll järn och svavel. Pumpning återställde normala förhållanden på några få dagar, utom för svavelpartiklar som fortfarande fanns i förhöjda halter efter en vecka. Järnhydroxidpartiklarna förefaller i högre grad att sorberas på sprickväggarna och inte delta i transport över längre avstånd.

Undersökningar av oorganiska partiklars förmåga att transportera radionuklider pågår.

Analys av naturliga grundvattenkolloider och deras förmåga att transportera radionuklider är en del av studierna av naturliga analogier, se kapitel 9.

Humus- och fulvosyror har isolerats från djupa grundvatten. Materialet har koncentrerats, renats, analyserats och använts i radionuklidkemiska experiment, se Tabell 7-3. En beräkningsmodell för jonbindning till humus- och fulvosyror har tagits fram vid New York universitetet i Buffalo /7-25/. I den modellen behandlas humus- och fulvosyror som polyelektrolyter.

Tabell 7-3. Analyser av fulvosyror från ytliga och djupa grundvatten.

Plats Djup (m)	Bersbo Ytvatten	Fjällveden 409	Finnsjön 232	Gideå 107
GRUNDTVATTNETS OORGANISKA KEMI				
pH	5,3	7,5	7,7	8,8
Eh(mV)	—	-110	-270	-10
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	5,5	170	260	161
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	36	0,2	140	0,8
F ⁻ (mg/l)	<0,1	0,7	2,3	2,6
Cl ⁻ (mg/l)	7,2	7	1500	4,4
Na ⁺ (mg/l)	5,8	32	650	49
Ca ²⁺ (mg/l)	8,3	21	320	10
K ⁺ (mg/l)	1,8	2,5	8,7	2,2
Mg ²⁺ (mg/l)	8,6	0,4	40	2,6
Ålder ¹⁴ C, karbonat (år)	—	4235	8090	6450
FULVOSYRORNAS KEMI				
Molekylvikt Mw	2650	1700	2650	1600
C (%)	52,5	50,8	53,0	53,7
H (%)	3,6	3,9	3,8	4,4
N (%)	1,1	1,7	0,9	0,5
O (%)	38,8	39,7	36,2	37,5
S (%)	1,0	0,8	1,1	0,5
Aska (%)	3,0	3,1	5,0	3,4
Syracapacitet i vatten (mekv/g)	4,65	5,14	4,98	5,42
Ålder ¹⁴ C (år)	—	1270	4610	5250

Betydelsen av komplexbildning mellan radionuklider och naturliga humus- och fulvosyror har även studerats i samarbete med franska CEA /7-26, 27/.

SKB stöder deltagandet av en svensk expert i CEC's internationella arbetsgrupp COCO. Gruppens uppgift är att avgöra betydelsen av naturliga kolloider och komplexbildare för transport av radionuklider.

Mikrober i djupa grundvatten har analyserats genom provtagning med kemivagnen och speciell provtagning in-situ med kemisonden. För det senare ändamålet har en sk gasprovtagare använts. Djupt grundvatten har befunnits innehålla mikrober i halter på mellan 10⁵ och 10⁶ bakterier per ml /7-28/. Mikrober i grundvatten och på mineral samt deras potentiella betydelse för radionuklidmigration och geokemi behandlas även inom ramen för Poços de Caldas projektet, se kapitel 11. Detsamma gäller transport av radionuklider med partikulärt material och organiska komplexbildare.

SORPTION OCH DIFFUSION

Undersökningarna av radionuklidmigration i bentonit och indiffusion av radionuklider i bergets mikroporer har fortsatt. Diffusion av fissionsprodukterna strontium, teknetium och cesium samt aktiniderna torium, protaktinium, uran, plutonium och americium i kompakterad bentonit har uppmätts, tolkats och rapporterats /7-29/. Betydelsen av nuklidernas speciering i lerans porvatten har konstaterats i försöken. Så diffunderar exempelvis teknetium tio gånger långsammare under reducerande förhållanden.

Diffusion av radionuklider i sand-bentonitblandningar studeras experimentellt.

Indiffusion i berg har uppmätts med radionuklider av strontium, teknetium, jod, cesium, neptunium, plutonium och americium /7-30/. Bergbitarna hade tagits från borrkärnor i granitiskt berg i Finnsjön, Stripa och Studsvik. Den uppmätta diffusiviteten varierade mellan ca 10⁻¹³ till 10⁻¹⁵ m²s⁻¹, beroende på nuklid. Man kan även se hur olika mineral och sprickmineral sorberar olika nuklider.

Användning av betong i befintliga eller framtida alternativa förvarskoncept kan visa sig fördelaktig av olika skäl. Det har därför bedömts nödvändigt att fortsätta de kemiska experimenten med betong och radionuklider. Laboratorieförsök genomförs med diffusion i betong och diffusion från betong till bentonit. Även betongens kemiska förändring med tiden undersöks.

Bentonit med tillsatser, sk getters, undersöks experimentellt. En serie olika föreningar har prövats. Tillsatser som verkar reducerande har befunnits ha en gynnsam retarderande effekt på diffusionen av redoxkänsliga radionuklider.

Sorptionsexperiment har genomförts med radionuklider av natrium, strontium, cesium och europium /7-31/. Sorptionen på krossat sprickfyllnadsmaterial och krossad granit jämfördes med sorptionen på intakta spricktytor. Experimenten genomfördes för att erhålla kompletterande information till laboratorieundersökningarna av radionuklidmigration i överborrade bergsprickor. De senare försöken är ett led i valideringen av transportmodeller för att beskriva radionuklidmigrationen i berg.

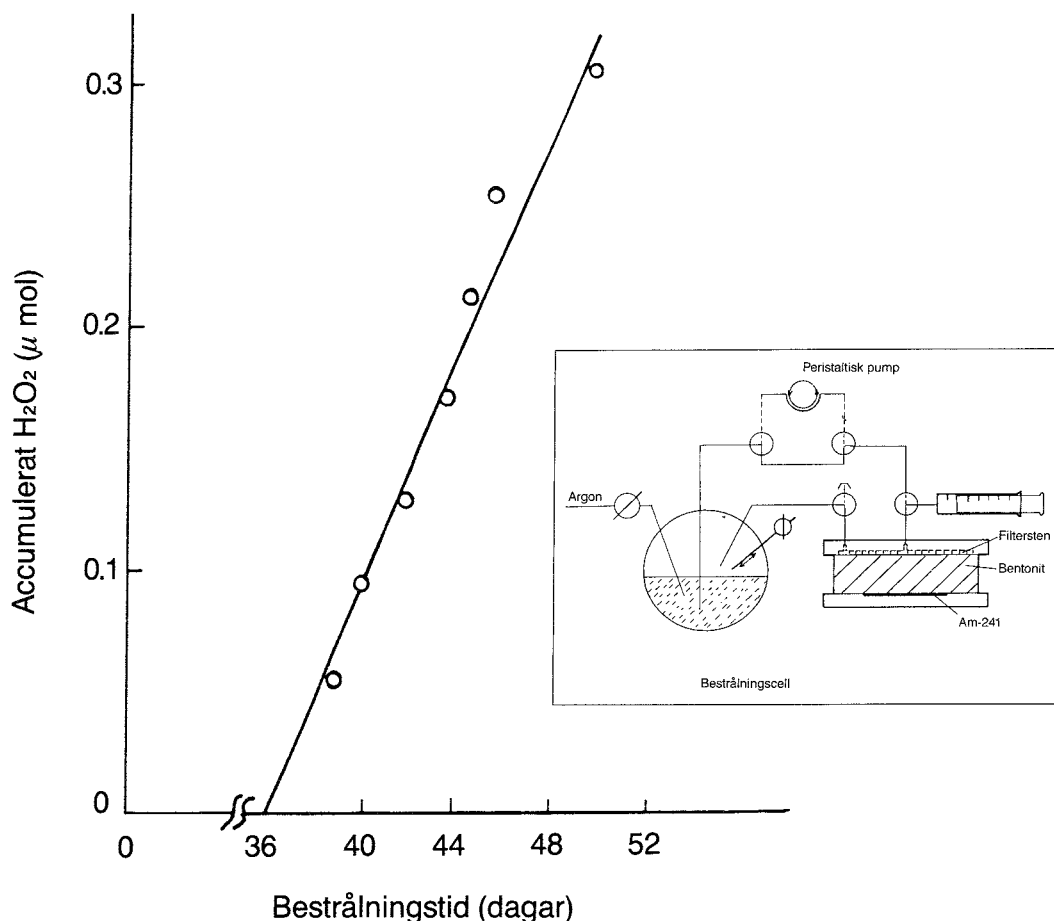
Sorptionsförsök genomförs även för att se effekten av olika förhållande vätska/fast fas och betydelsen av att ha flernuklidblandningar.

Ytkomplexeringsteorin testas som en modell för att beskriva sorption och diffusion av radionuklider på mineraltytor. Metoden har tidigare tillämpats med framgång på sorption på rena oxidtytor. Experiment genomförs för inkluderad sorption på mineraltytor.

RADIOLYS

Produktionen av väte i kompakterad vattenmättad bentonit till följd av bestrålning med alfapartiklar har uppmätts experimentellt och jämförts med teoretiska beräkningar som använder en homogen reaktionsmodell för radiolys /7-32, 33/. En relativt god överensstämmelse erhöles.

Experiment har även genomförts för att bestämma utbredningen av en redoxfront i kompakterad bentonit till följd av alfabestrålning /7-34/, se Figur 7-1.



Figur 7-1 Bestrålning av kompakterad vattenmättad bentonit med alfa-partiklar. Genombrottet av radiolytiskt producerad väteperoxid följs som en funktion av tiden.

Även här erhöles relativt god överensstämmelse med beräknade värden. Man fann vidare att endast en del av det tvåvärda järnet i bentonit är tillgängligt för reaktion med radiolytiskt producerade oxidanter.

Experiment och teoretiska beräkningar har även genomförts för den radiolytiska produktionen av oxidanter vid alfaradiolys av simulerat grundvatten /7-35/. Produktionen av väteperoxid har analyserats och påverkan från grundvattenkomponenter som klorid, karbonat och tvåvärda järnjoner har bestämts. Överensstämmelsen mellan beräkningar och experiment har varit relativt god.

7.2.3 FORSKNINGSPROGRAM 1990-1995

LÖSLIGHET, SPECIERING, MEDFÄLLNING OCH KINETIK

Fortsatta mätningar av termodynamiska, lösningskemiska konstanter för aktinider i naturvattensystem förutses. För mätningar på uran- och plutoniumhydroxidkomplex kommer man att pröva vätskeextraktionsteknik. De påbörjade undersökningarna av fos-

fatkomplex förutses få ökad omfattning. Framtagning av jämviktskonstanter genom mätningar eller kritisk granskning av befintliga värden är ett viktigt led i den successiva uppbyggnaden av SKB's termodynamiska databas.

Reduktionen av redoxkänsliga radionuklider t ex teknetium är trög, vilket gör det besvärligt att tolka olika experiment t ex sorptions- och migrationsförsök under naturliga reducerande förhållanden. Kinetiska försök planeras därför.

Medfällningsförsöken kommer att fortsätta. Speciellt avser man att pröva medfällning vid kalcitbildning och bildning av järn(III)oxider.

Aktinidernas kemi är annorlunda i betongmiljö pga de kemiska förhållandena. Jämfört med naturvatten är pH högt och karbonathalten låg. Detta undersöks.

KOLLOIDER, HUMINKOMPLEX OCH MIKROBER

Provtagning och analys av sådana ämnen i naturliga grundvatten spelar även fortsättningsvis en mycket viktig roll. Ytterligare försök med radionuklider, radionuklidliknande ämnen och huminämnen kommer att utföras.

Försök med radionuklider och kolloider samt försök med radionuklider och mikrober kommer att utföras.

Tyngdpunkten i undersökningarna kommer att ligga på naturliga organiska komplexbildare såsom humus- och fulvosyror. Ökade insatser på området kolloidtransport eftersträvas.

In-situ undersökningar planeras i samband med berglaboratoriets driftsskede.

SORPTION OCH DIFFUSION

Laboratorieförsök med sorption och diffusion av radionuklider i bergmaterial fortsätter. En viktig uppgift är att pröva mera avancerade modeller för sorption och diffusion där ytdiffusion, ytkomplexering, ytreaktioner etc. ingår. Man siktar härvid mot en ökad förståelse av fenomenen och framtagning av submodeller, som kan användas i transportmodellerna.

Laboratorieförsöken med sorption och diffusion i betong skall belysa eventuella fördelar eller konsekvenser av att betong används i ett förvar för högaktivt avfall. Häri ingår att avgöra betongens inverkan på omgivningen och betongens egen kemiska och strukturella förändring med tiden.

Försöken med tillsatser, sk getters, till en bentonitbuffert fortsätter. Ett första steg för att hitta ämnen med experimentell påvisbar gynnsam effekt har tagits. Nästa steg är att bland dessa välja sådana som är praktiskt möjliga att använda. Därefter återstår att visa att de föreslagna tillsatserna inte kan påverka bufferten, kapseln eller andra närområdeskomponenter negativt under den mycket långa tid som barriärfunktionen måste bibehållas.

RADIOLYS

Den radiolyskinetiska modellen behöver gås igenom och mera grundläggande försök kan visa sig nödvändiga. En viktig punkt som återstår att behandla är inverkan av bränsleytan på radiolysens kemiska förlopp, se även kapitel 3.

7.3 KEMISK TRANSPORT OCH VALIDERING AV TRANSPORTMODELLER

7.3.1 Mål för FoU-verksamheten

Målet är att utveckla och validera de modeller som används för att beskriva frigörelse, spridning och kvarhållning av radionuklider från ett slutförvar liksom förändringarna i närområdet, t ex uppkomsten av en redoxfront pga radiolys.

Validering av kemiska transportmodeller sker genom:

- laboratorieförsök,
- spårförsök,
- studium av naturliga analogier.

7.3.2 Nuvarande kunskapsläge

Transport av upplösta ämnen med det naturliga grundvattenflödet i berg beskrivs med beräkningsmodeller. Utgångspunkten för dessa modeller är i sin tur beräkningar av vattenflödet och en beskrivning av flödets fördelning i berget. Fördelningen av vattenflödet mellan olika vattenförande sprickor och i själva sprickorna har mycket stor betydelse för spridningen av upplösta ämnen i grundvattnet. Förekomst av preferentiella flödesvägar, sk kanaler, kan minska transporttiderna och även minska retention av upplösta radionuklider genom minskad kontaktyta mot berget. Detta har beskrivits ingående /7-36/ och även använts som utgångspunkt för konservativa ansatser inom genomförda säkerhetsanalyser för SFR och WP-Cave.

SPÅRFÖRSÖK

Spårförsök kan anses som en utbyggd interferenspumptest. Förutom tryckresponser dvs konnektiviteter får man fram längden och transportförmågan hos flödesvägarna. I själva verket är spårförsök den enda metod med vars hjälp man kan komma åt vattnets transporttider mellan två punkter, och således kontrollera giltigheten hos de modeller för vattenomsättning som upprättats på basis av hydrotester. Extremfallen utgörs av att vattnet rör sig i ett enda strömrör respektive att det strömmar i ett homogent poröst medium. I stor skala är den porösa modellen sannolikt fullt acceptabel medan man i mindre skalor är tvungen att ta hänsyn till stråkning eller kanalisering.

Spårförsök har utförts i olika skalor, i Finnsjön och i Stripa. De försök som utförts i Stripa har mestadels fokuserats på transport i det goda berget, medan spårförsök i Finnsjön har fokuserats på en horisontell sprickzon med hög konduktivitet. Resultaten av försöken har också varit olika. Transporten i Finnsjön kan mycket väl beskrivas av en porös kontinuum modell medan transporten i Stripa tyder på stark stråkning eller kanalisering.

Kanalbildningsmodellen för vattenflöde i enskild spricka har behandlats /7-37/. En tvådimensionell statistisk modell har använts för att simulera en vattenförande spricka /7-38/. Vattenflöde och transport av upplösta ämnen i sprickan har modellerats för olika realiseringar av modellsprickan.

Försök i Stripa

Spårförsök med vattentrogna spårämnen genomförs i Stripa gruva inom ramen för det internationella OECD/NEA projektet, se kapitel 10. Migrationsavståndet har varierat mellan ca 1—50 m. Längre transportsträckor har i ett fall observerats. En viktig målsättning har på senare tid varit att påvisa vattenflödets fördelning över sprickytorna och mellan olika sprickor.

Radarmätningar har framgångsrikt använts i Stripa för att följa flödet av salt vatten som injicerats i vattenförande sprickor mellan borrhål.

En serie experiment i Stripa för att validera förekomsten av ett sammanhängande porsystem i lågkonduktivt berg har nu avslutats och avrapporterats

/7-39/. Försöken började redan 1982. En blandning av tre vattentrogna spårämnen, Uranin, krom-EDTA-komplex och jodid injicerades i intakt granitiskt berg under 3 månader, 6 månader och 3,5 år. Provtagning visade, att i det försök som pågått längst hade spårämnen trängt ut åtminstone 400 mm i berget, se Figur 7-2. Resultaten från alla tre experimenten visar, att alla tre spårämnena har migrerat genom den påverkade zonen nära injektionshålet, genom sprickfyllnadsmaterial och vidare in i det ostörda berget. Slutsatsen är därför, att upplösta ämnen kan diffundera in i bergmatrisen och radionukliderna kan på så sätt tas upp och hållas kvar av berget.

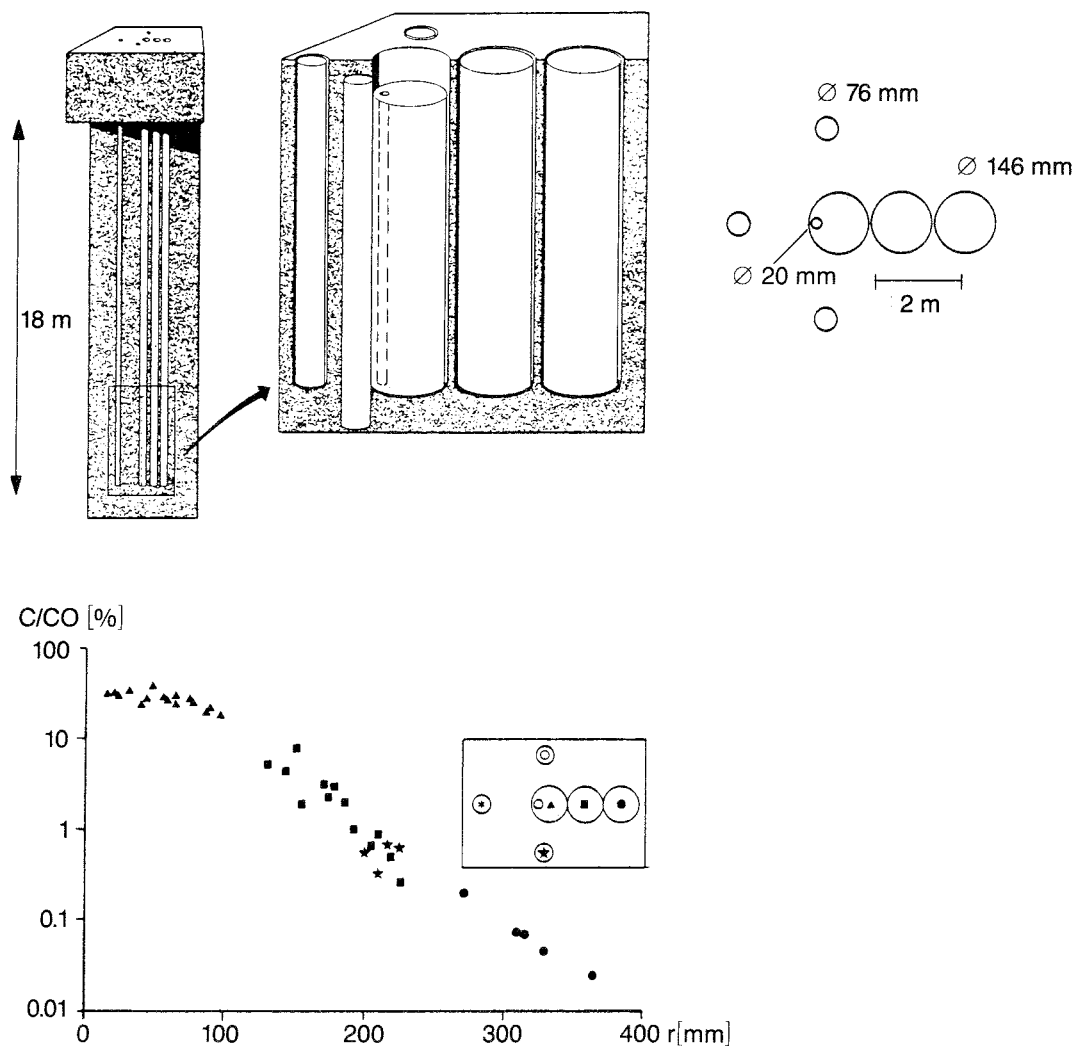
Försök i Finnsjön

Spår-försök i en större sammanhängande sprickzon utförs i Finnsjön. Den flacka sprickzonen är ca 100 m bred och ligger på ett djup av mellan 100 och 300 m i

området. En ingående geofysisk och hydrologisk uppmätning har föregått spår-försöken. Man kan se spår-försöken i Finnsjön som en kedja av undersökningar som successivt pusslar ihop en bild av grundvattenflödet i den undersökta zonen. Hittills har interferens-pumptest, radiellt konvergerande spår-försök och dipolförsök genomförts. Utvärderingen av radiellt konvergerande försöket är gjord medan utvärderingen av dipolförsöket endast påbörjats. Inför varje nytt försök har en prediktion gjorts på basis av de tidigare resultaten. Data från förundersökningar och spår-försök i Finnsjön görs tillgänglig för oberoende utvärdering av andra vetenskapsmän och grupper genom INTRAVAL-studien.

Försök i Hylte

Metoder att genomföra spår-försök i anslutning till en sprickzon som skär en tunnel utvecklas i samband med in-situ försök i Hylte.



Figur 7-2 Bilden visar hur det ursprungliga injektionshålet har överborrats för provtagning av berget efter 3,5 år. Ett antal ytterligare provtagningshål har borrats i ett arrangemang runt injektionshålet. Borrhålen utgår från golvet i en tunnel i Stripa på 360 m nivå. Ett exempel på resultat av analyserna framgår av punkterna i diagrammet, som visar hur jodidjoner trängt ut i berget från injektionshålet.

Spårämnen

Spårämnena kan grupperas dels utgående från deras kemiska egenskaper, vattentrogna och sorberande, och dels med hänsyn till deras beskaffenhet, färgämnen, metallkomplex och joner. En ytterligare uppdelning kan göras mellan stabila och radioaktiva spårämnen.

Radioaktiva spårämnen kan hanteras i mycket lägre halter än motsvarande stabila ämnen. De har dessutom den fördelen att de försvinner efter en tid så att samma spårämnen kan användas vid senare försök. I Finnsjön har radioaktiva spårämnen använts i dipolförsöket.

Vattentrogna spårämnen kan användas vid storskaliga spår försök medan de svagt sorberande ämnena endast kan komma till användning vid spår försök över korta avstånd. Metallkomplex och färgämnen är företrädesvis vattentrogna medan alla joner och speciellt katjonerna är sorberande.

Under 1988 och 1989 har mycket omfattande arbete lagts ned på att dels gallra fram lämpliga spårämnen och dels prova dem under de specifika förhållanden som råder vid försök där de skall användas. På så sätt har en provningsprocedur för spårämnen utvecklats. Det har visat sig att plats specifika förhållanden har stor betydelse för vilka spårämnen man kan använda.

KOPPLADE TRANSPORTMODELLER

Avancerade modeller som kopplar transport med geokemiska reaktioner har prövats och tillämpats /7-40/. En viktig tillämpning har varit beräkningen av den kemiska växelverkan mellan bentonit och betong med datorkoden CHEMTRN som har utvecklats vid Lawrence Berkeley Laboratories i USA /7-40/.

Kopplade modeller transport-geokemi utvecklas även för att simulera vandrigen av en redoxfront /7-41/.

LABORATORIEFÖRSÖK

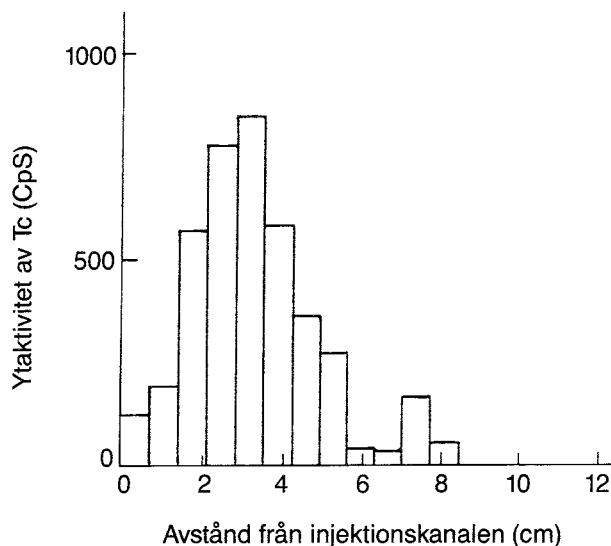
Borrkärnor tas så att de innehåller en naturlig spricka längs borrkärnans axel. Sålunda överborrade bergsprickor används för migrationsförsök och flödesprov i laboratorium.

Resultaten används för att validera transportmodeller. Data från tidigare genomförda försök sammanställs för att ingå som ett fall i det internationella projektet INTRAVAL som leds av SKI. Härigenom kan transportmodeller prövas, ev valideras, av olika och oberoende grupper.

Ett väl slutet system innehållande en borrkärna med naturlig spricka och utrustning för injektion och provtagning har tagits fram för att kunna genomföra simuleringar av migration under naturliga reducerande förhållanden. Transport av teknetium har undersökts med denna utrustning, se Figur 7-3, /7-42/.

NATURLIGA ANALOGIER

Undersökningar av naturliga analogier till frigörelse och transport av radionuklider har varit koncentrerat till Poços de Caldas projektet, se avsnitt 11.1. Insatser utanför projektet genomförs för att underlätta och stödja modellbehandlingen av data från projektet.



Figur 7-3 Fördelningen av teknetium på en sprickyta i granit efter 50 minuters eluering. Försöket har genomförts under reducerade förhållanden som åstadkommit med simulerat grundvatten och krossat berg.

Exempel på sådan stödjande verksamhet med direkt inriktning på Poços de Caldas projektet är utveckling av kopplade modeller för vandring av redoxfront och geokemiska modellberäkningar av dels grundvattnets sammansättning och dels radionuklidernas kemi i grundvattnet.

7.3.3 Forskningsprogram 1990-1995

LABORATORIEFÖRSÖK

Experiment med radionuklidtransport i friborrade öppna sprickor fortsätter. Betydelsen av reducerande förhållanden och storleken av flödet över sprickytan är viktiga frågeställningar även fortsättningsvis. Särskilda insatser görs för att klarställa reduktionskinetikens inverkan på försöken.

Ökade insatser kommer att sättas in för att validera modeller för förbrukning av oxidanter, reduktion av aktinider, medfällning och bakteriell inverkan. Under driftsskedet i berglaboratoriet är ett antal in-situ försök planerade för att studera förhållandena i samband med frigörelse och migration av radionuklider. Inför och under migrationsförsöken i berglaboratoriet kommer laboratorieförsök att initieras inom kemiprogrammet för att förbereda och stödja underjordsexperimenten. Detta torde bli en väsentlig aktivitet som kommer att engagera en stor del av kemiprogrammet 1990-95.

SPÅRFÖRSÖK

Ytterligare spår försök med vattentrogna spårämnen kommer att genomföras inom Stripaprojektet och i samband med berglaboratoriet. En fortsättning på spår försöken i Finnsjön diskuteras f n. För berglaboratoriet är inriktningen att även genomföra försök med

sorberande ämnen, prova bergets reducerande egenskaper gentemot syre och redoxkänsliga radionuklider och pröva transport av kolloidala och komplexbundna radionuklider.

Under perioden 1990-1995 kommer spår försök att huvudsakligen utföras i berglaboratoriet. Syftet och omfattningen av dessa framgår ur beskrivningen i kapitel 9 och relateras endast kort nedan.

- Ett storskaligt spår försök under byggskedet och under driftskedet syftar till att belysa hur vattnet rör sig över avstånd på 100—500 m. Ett stort antal in-flödespunkter och injiceringspunkter kommer att utnyttjas.
- Ett blockskaligt spår försök under driftskedet syftar till att beskriva vattnets rörelse i det goda berget och i sprickzoner i skala 10—50 m.

Som avslutning på Site Characterization and Validation test i Stripa kommer också spår försök att genomföras. Dessa kommer att påverka utformningen av det blockskaliga spår försöket i berglaboratoriet.

SPÅRÄMNINGEN

Under 1990 skall en spårämneshandbok sammanställas på basis av de resultat som erhållits vid försöken i

Finnsjön och Hylte. Frågor som skall behandlas är:

- Vilka spårämnen kan man använda vid försöken?
- När kan man använda de olika spårämnena?
- I vilken ordningsföljd skall spårämnena användas?
- Vilka prov skall man genomföra före försöken?

En viktig del av arbetet gäller att definiera sorptions-egenskaperna hos de svagt sorberande ämnena eftersom dessa i viss mån kan användas för att särskilja de olika begreppsmodellerna.

NATURLIGA ANALOGIER

I samarbete med England (UK DoE), Schweiz (NAGRA), USA (US DOE) och Brasilien genomförs en undersökning av naturliga analogier i Poços de Caldas i Brasilien. Arbetet påbörjades i maj 1986 och skall enligt planerna pågå till mars 1990, se även avsnitt 11.2.

SKB följer Aligator Rivers projektet, ARAP (Aligator Rivers Analogue Project), genom deltagande i IN-TRAVAL projektet, där data från såväl Poços de Caldas projektet som Aligator Rivers projektet bearbetas med ett brett internationellt deltagande. SKB diskuterar f n med den kanadensiska organisationen AECL om att delta i Cigar Lake projektet i Kanada under i första hand en treårsperiod från 1989.

8 METOD- OCH INSTRUMENTUTVECKLING

8.1 MÅL FÖR FoU-VERKSAMHETEN

Med metoder och instrument avses i detta kapitel mätmetoder för insamling av geologiska, geohydrologiska, geofysiska, grundvattenkemiska och bergmekaniska parametrar för karakterisering av en bergvolym samt mätinstrument som används för denna mätdatainsamling. Hur metoderna tillämpas i SKBs geovetenskapliga forskning har beskrivits i avsnitt 6.2.2.1.

Målet för metod- och instrumentutveckling är att tillse att lämpliga metoder och instrument finns tillgängliga för högkvalitativ insamling av sådan mätdata som erfordras för karakterisering av en bergvolym för ett slutförvar samt för analys av säkerheten hos ett sådant slutförvar för radioaktivt avfall.

Medan den huvudsakliga metodutvecklingen sker inom ramen för olika projekt bedrivs instrumentutvecklingen oftast genom särskilda utvecklingsprojekt.

8.2 NUVARANDE KUNSKAPSLÄGE

Kunskapen om bergets egenskaper på djup som kan bli aktuella för ett svenskt slutförvar för radioaktivt avfall, ca 500 m eller mer, var i mitten av sjuttioalet relativt begränsad, framförallt vad gäller kristallin berggrund.

Borrningar efter olja och gas hade företrädesvis skett i sedimentär berggrund. Vattenprospektering utgjorde en begränsad källa för datainsamling i och med det ringa djupet, 50—150 m. Prospekteringsverksamheten efter mineral och malmer sträckte sig visserligen ner till större djup men hade varit begränsad till ett färre antal malmområden i Sverige. Datainsamlandet koncentrerades av naturliga skäl oftast till bergarter och strukturer som var av betydelse för att klarlägga malmernas ursprung.

Behoven hade lett fram till att effektiva kärnbörningsagregat hade utvecklats så att kontinuerliga bergartsprover, borrhärlor, kunde hämtas upp från den genomborrade bergvolymen för inspektion. Utöver detta användes borrhålen i begränsad omfattning till geofysisk borrhållsloggning. Geofysisk loggning var relativt väl utvecklad för oljeprospektering i sedimentär berggrund men låg i sin linda vad det gäller kristallin berggrund. Däremot hade geofysiska mätningar från markytan utvecklats till relativt användbara hjälpmedel.

Hydrologiska metoder hade redan tidigt börjat användas inom grundvattenprospekteringen för bestämning av bergets vattenförande och magasineringsegenskaper, dock med den begränsningen att dessa gällde för homogena akvifärer, vanligen vattenförande lager i sedimentär berggrund. Dessa metoder utvecklades

sedan vidare i samband med beräkningar av oljereservoarers volymminnehåll etc, och kom sedermera att utgöra bas för de geohydrologiska metoderna även i kristallin berggrund.

Den under sjuttioalets senare hälft kraftigt expanderande forskningen kring slutförvaring av radioaktivt avfall medförde stora framsteg inom området mätmetoder och -instrument. Geofysiska metoder och instrument har kommit att bli viktiga verktyg och en stark utveckling på detta område har därför skett framförallt vad gäller mätningar från borrhål.

Vad gäller geohydrologiska metoder har SKB satsat mycket på att få fram lämpliga metoder för den svåra uppgiften att karakterisera vattnets förekomst och strömningsvägar i en kristallin berggrund med sitt komplicerade mönster av sprickor. Metodutvecklingen inom geohydrologin har också medfört avsevärda satsningar på utveckling av lämpliga mätinstrument.

8.2.1 Mätmetoder och instrument för ytundersökningar

I denna sammanställning över kunskapsläget inom metoder och instrument för ytundersökningar kommer metoder för framtagning av satellitbilder, flygbilder, topografiska och geologiska kartor ej att behandlas även om sådan information är av stor betydelse för SKBs geoforskning.

Vad gäller flyggeofysik finns metoder för mätning och produktion av magnetkartor, strålningskartor, elektromagnetiska kartor etc av hög teknisk kvalitet tillgängliga /8-1/. Samtidigt kan konstateras att sådan kartläggningsverksamhet, vilken i kombination med geologisk kartläggning är av stor betydelse för den landsomfattande resursplaneringen, har kraftigt reducerats under senare år, främst beroende på nedskurna statliga anslag.

Ett stort antal geofysiska mätmetoder finns tillgängliga för mätning från markytan /8-2, 3/. Även från markytan är magnetiska och elektromagnetiska metoder (Slingram och VLF) av stor betydelse för att bestämma läge och utbredning av bergblock och sprickzoner. I andra sammanhang kan elektriska mätmetoder vara utslagsgivande. Bland akustiska metoder är refraktionsseismik och reflexionsseismik bäst lämpade för detektering av krosszoner på ringa respektive stort djup /8-4/. Radarmetoden, som hittills utvecklats för borrhållsmätningar, bör efter anpassning kunna bli ett värdefullt verktyg även för markmätningar. Både vad det gäller seismik och radar bedöms möjligheterna till vidareutveckling vara stora, dels avseende mätningar mellan borrhål, tunnlar och markyta och dels avseende tolkningsmetodik.

Både vad gäller flyggeofysik och markgeofysik har på senare tid tolkningsarbetet fått värdefulla bidrag i

och med att bildbehandlingstekniken utvecklats. Inom detta område finns fortfarande en stor utvecklingspotential.

8.2.2 Mätmetoder och instrument för undersökningar i borrhål

I denna sammanställning redogörs för de mätmetoder och instrument som är tillgängliga för datainsamling från borrhål. Då icke annat nämns gäller att mätningar kan göras i borrhål av 56 mm diameter eller större och att tekniken fungerar i 1000 m långa (djupa) borrhål /8-5/.

8.2.2.1 Borrning

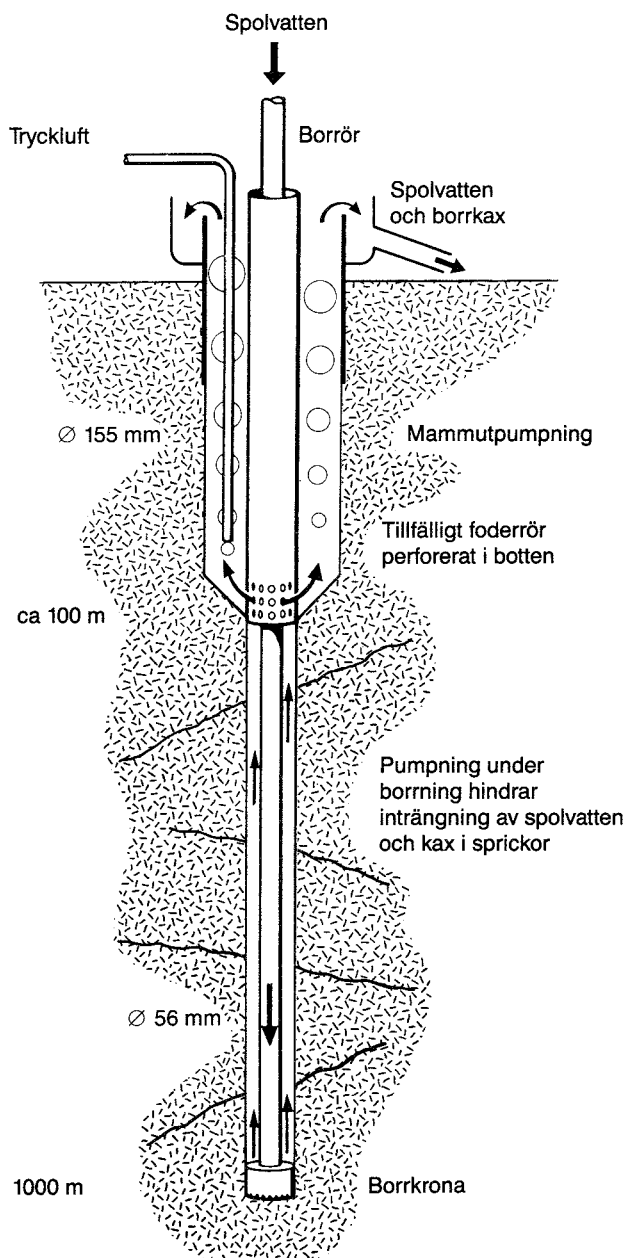
Som tidigare nämnts utgör kärnbrorring stommen i SKBs borrhållsverksamhet. Den dominerande andelen borring görs med 56 mm diameter medan 76 mm diameter används i särskilda fall då t ex speciella mätningar så erfordrar. Vid kärnbrorring pumpas spolvatten ner i borrhålet, dels för att kyla borrkronan och dels för att spola upp det bergmjöl (borrkax) som produceras. Såväl borrkaxet som spolvattnet i sig verkar i viss mån negativt på de mätningar som ska utföras i borrhålet. En del av spolvattnet pressas ut i bergets sprickor och inverkar då störande vid den kemiska analysen av vattenprover. En viss del av borrkaxet tränger samtidigt in i sprickorna och kan då störa de hydrologiska mätningarna. För att komma till rätta med dessa problem eller åtminstone ha kontroll på effekterna tillsätts ett spårämne till spolvattnet så att man i senare provtaget vatten kan kontrollera eventuell inblandning av kvarvarande spolvatten.

SKB har utvecklat en modifierad kärnbrorringsteknik som innebär att man genom pumpning skapar ett undertryck i hålet, se Figur 8-1. Därigenom förhindras eller åtminstone reduceras inträngningen av kax och spolvatten i bergets sprickor. För att möjliggöra detta borras sk teleskopborrhål där de översta ca 100 m av borrhålet har en större diameter och från denna del kan sedan sk mammutpumpning utföras.

Som komplement till kärnbrorring, företrädesvis då 100–200 m djupa hål erfordras, används hammarborring. Även i samband med denna borrhållsmetod har geohydrologiska och kemiska mätmetoder integrerats under borringen för att optimera datafångsten. Hammarborringsteknik för större djup än 100–200 m har utvecklats med hjälp av högkapacitets lufttrycks kompressorer. Det största motivet för denna typ av borring är att undvika inblandning av spolvatten i grundvattnet. Metoden har visat sig fungera bra för vattenupptagning ner till dess en kraftigt vattenförande zon penetreras. Kraftig vatteninströmning förhindrar effektiv avbördning av vatten med följden att grundvattnet blir kontaminerat av luft och syre.

8.2.2.2 Kartering av borrhåll och borrhål

Vid kartering av borrhåll är det viktigt att förutom bergartsklassificering även kartlägga berggrundens strukturer samt sprickornas utseende och riktning. Man bör avgöra om sprickorna är naturligt utbildade,



Figur 8-1 Borrning av sk teleskopborrhål

om de har läkts ihop av sprickmineral eller om det rör sig om sprickor som utbildats i samband med borringen. Sprickmineral karteras och man bearbetar materialet statistiskt bl a med avseende på korrelationer mellan sprickriktningar och sprickmineral /8-6, 7/. Som hjälpmedel för denna kartering har ett datoriserat karteringsinstrument skräddarsytt med vilket framförallt den statistiska bearbetningen och datapresentationen underlättas. Att bestämma sprickors 3-dimensionella riktning från borrhållskärnan är en besvärlig uppgift. Olika orienteringsmetoder finns, men de flesta är tidsödande och/eller relativt otillförlitliga.

Borrhålls-TV och televier är två metoder med vilka man kan orientera enskilda sprickor direkt i borrhålet. Borrhålls-TV finns för närvarande endast tillgänglig för inspektion ner till 500 m djup. Orienteringen görs med hjälp av inbyggd kompass och lutningsmätare. Med rätt belysning har metoden fördelen att ge en vi-

suell bild av borrhålsväggen men orienteringsarbetet kräver stort manuellt arbete. Metoden har dock en stor utvecklingspotential dels mot större djup och dels mot automatisk orientering via bildbehandling. Televiwer är ett annat instrument som sänks ner i borrhålet för att med hjälp av ultraljud scanna av borrhålsväggen. Denna metod har på senare tid utvecklats så att den kan användas även i så smala borrhål som 56 mm, vilket nyligen provats inom berglabsprojektet. Metodens datapresentation är väl utvecklad så att sprickornas riktning relativt enkelt kan bestämmas.

8.2.2.3 Geofysiska mätningar i borrhål

Geofysisk borrhålsloggning

Geofysisk borrhålsloggning är ett hjälpmedel som används rutinmässigt vid SKBs platsundersökningar. Dessa mätningar kompletterar kärnkarteringen men kan också användas i hammarborrhål där ingen borrhålskärna kan studeras /8-7/. Huruvida en spricka eller sprickzon är öppen och vattenförande kan vara omöjligt att bestämma med enbart kartering av borrhålskärnan, men här kan geofysiska loggningsmetoder indikera vatteninnehåll. Dessa är exempelvis borrhålsvätskans resistivitet och temperatur medan man med hjälp av de båda radioaktiva metoderna neutron och gammagamma (framförallt i kombination) kan få indikation om porösa partier (t ex sprickzoner) respektive bergarter med hög densitet (t ex grönstensgångar). Mätning av naturlig gammastrålning är främst användbar för att särskilja olika bergarter. Flera elektriska loggningsmetoder finns vilka framförallt används för att detektera uppspruckna partier eller enskilda sprickor. Andra mätmetoder bygger på bergets varierande elasticitet och magnetisering. Kombinationer av olika metoders mätresultat är ett område där utvecklingen går framåt genom förbättrad bearbetnings- och presentationsteknik.

Borrhålsradar

Fysiska metoder som på senare tid genomgått en omfattande utveckling är borrhålsradar och borrhålsseismik. Radartekniken, vars vanligaste och allmänt kända tillämpning främst har varit för bevakning av lufttrum samt flyg- och sjösäkerhet, har under ett par decennier också utvecklats för mätning av jordlager från markytan. Ett stort steg togs när radarmetoden utvecklades för användning vid bergundersökningar i borrhål /8-8/. Metoden går ut på att elektromagnetiska pulser med frekvenser i området 20—100 MHz sänds ut i bergvolymen kring borrhålet. Framförallt olikheter i bergets elektriska men också magnetiska egenskaper ger sig till känna antingen i form av reflexionsytor eller genom dämpning av signalen tills den återkommer till signalmottagaren. Metoden har utvecklats i hög grad genom SKB-projekt och då främst inom det internationella Stripa-projektet. Den kan i dag utföras både som enhålsmätningar och mellanhålsmätningar. Radarinstrumentet har hög teknisk nivå och mätresultaten presenteras som bilder där

exempelvis sprickzoner och bergartsgångar framträder som plana strukturer eller som tomogram där hastighetsfördelning eller signaldämpning vidimerar anomala berggrundsförhållanden.

Metodens upplösning är i storleksordningen en våglängd, dvs 2—6 m. Anomala objekt som åtminstone i en dimension har denna längd kan generellt betraktas som detekterbara /8-9/.

Radarmetoden befinner sig fortfarande under intensiv utveckling. Bl a tas antenner med riktungsverkan fram så att man ska kunna bestämma riktningen till en reflekterande struktur. En av radarmetodens stora fördelar är, att den detekterar strukturer även utanför borrhålets omedelbara närhet, till skillnad från de tidigare beskrivna geofysiska loggningsmetoderna. Under gynnsamma förhållanden kan strukturer följas på avstånd upp till mer än 100 m från borrhålet.

Radarmätningar är känsliga för bergvolymens resistivitet. När porer och sprickor är fyllda med saltvatten dämpas radarsignalen kraftigt vilket innebär att räckvidden kraftigt reduceras. Saltvattnets kraftigt dämpande egenskaper kan dock också utnyttjas genom att exempelvis injicera saltvatten i en sprickzon som ursprungligen är fylld med sötvatten. Skillnader i radarbilderna före och under saltvatteninjektionen används för att bestämma om och i vilka partier en sprickzon är vattenledande. Denna mätteknik har provats och utgör exempel dels på utvecklingspotentialen i radarmetodiken och dels på hur kombinerade provningsmetoder kan förbättra karakteriseringar av bergpolymer.

Borrhålsseismik

En annan geofysisk metod som utvecklats i betydande omfattning är seismik. Seismiska metoder bygger på att akustiska vågors utbredning och reflexion speglar mediets elastiska egenskaper. Härvid bestäms de seismiska vågornas utbredningshastighet för att få ett mått på bergets uppsprickningsgrad. Således ger sprickzoner låg hastighet medan friskt berg ger hög.

Seismik har länge använts som refraktionsseismik och reflexionsseismik från markytan. En annan seismisk metod som på senare tid utvecklats i hög takt är borrhålsseismik som i likhet med borrhålsradar kan användas dels som enhålsmetod och dels som mellanhålsmetod med reflexionsdiagram respektive tomogram som mätresultat /8-10/. Stora ansträngningar har gjorts för att förbättra den seismiska sändaren, bl a genom introduktionen av piezoelektriska sändarelement med vilka den utsända vågen får ett känt frekvensspektrum, vilket i sin tur förenklar analysen av de returnerade vågorna. Denna utveckling har liksom för radar till stor del bedrivits och bedrivs fortfarande inom Stripa-projektets ram.

Andra tillämpningar av seismik är VSP, Vertical Seismic Profiling, och Tube Wave vilka båda bl a bygger på vågutbredning från markyta till borrhål. VSP används framförallt för att detektera strukturer som penetrerar borrhål, och då främst mer eller mindre horisontella sådana, men även strukturer under borrhålets botten kan identifieras. Metoden utgör ofta en kalibreringsmetod för reflexionsseismik från markytan. Tube Wave-mätningar går i princip till på samma sätt,

men i detta fall analyserar man ankomsten av sk tubvågor. Dessa uppstår där borrhålet skär en vattenfylld spricka när denna kommer i svängning genom den primära elastiska vågen /8-11/. Tubvågen fortplantar sig sedan längs borrhålet och detekteras med hydrofoner. Metoden har alltså som syfte att detektera öppna sprickor eller sprickzoner.

8.2.2.4 Geohydrologiska mätningar i borrhål

Geohydrologiska mätmetoder för användning i borrhål har genomgått en omfattande utveckling. Dels används passiva metoder där naturliga förhållanden mäts (tryck och flöde) och dels används aktiva metoder vilket innebär att man mäter rensens av en skapad störning i grundvattenmagasinet.

Hydrauliska mätningar

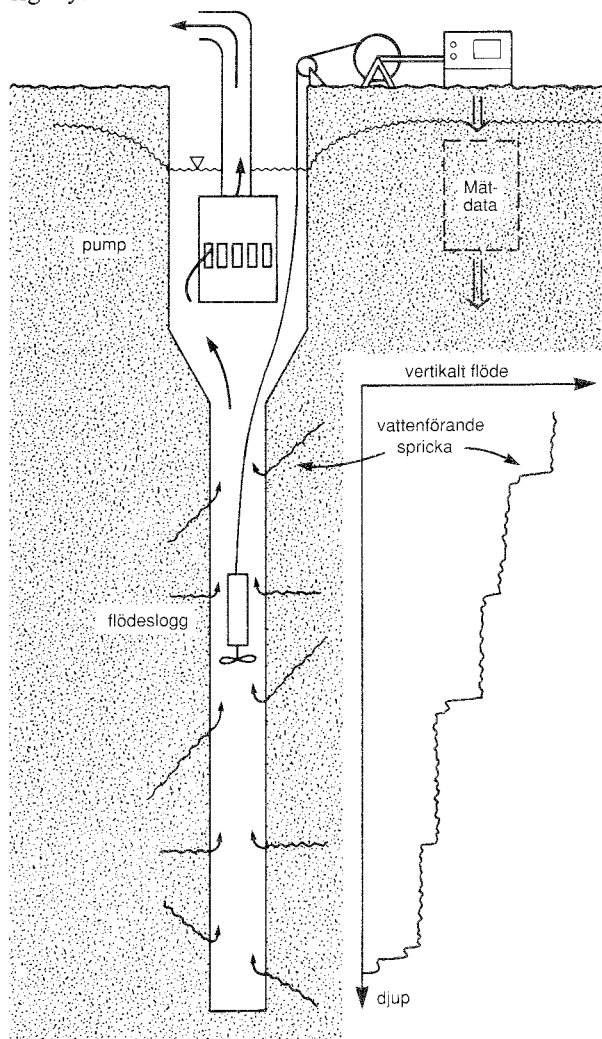
Redan i samband med borrhningen kan man ta tillfället i akt att göra en första hydraulisk mätning. Speciellt gäller detta vid hammarborrning då man, när man avslutar borrhningen, startar en stigningsmätning (mäter hur fort vattenytan återhämtar sig till den ursprungliga nivån). Motsvarande typ av mätning kan också göras vid kärnborrning, men då görs särskilda avbrott då man sänker ner en mammutpumputrustning och de 100 nedersta metrarna skärmas av med en manschett. Stigningsmätningarna som ger en översiktlig bild av borrhålets hydrauliska egenskaper i 100 m avsnitt är samtidigt ett exempel på kombinerade mätningar, eftersom vattenprover tas vid samma tillfälle.

Hydrauliska injektionsmätningar är en mätmetod som oftast används när den hydrauliska konduktiviteten ska bestämmas /8-12/. Metoden innebär att man med hjälp av 2 st manschetter skärmar av en borrhålssektion i taget och mäter hur mycket vatten som kan pressas ut i bergets sprickor. Såväl vattentryck, mätsektionernas längd som mättidens längd kan varieras kraftigt. Vid SKBs undersökningar används vanligen 3 m och/eller 30 m sektionlängd. I det förra fallet utförs mätningarna vanligen med 15 min injektionstid medan 2 timmar används vid 30 m mätningar. SKB har gjort stora insatser för att ta fram funktionella instrument med god noggrannhet för dessa mätningar. Således har sk multivagnar konstruerats med vilka mätningarna genomförs helt automatiskt genom datorstyrning /8-5/. Med en annan utrustning, rörgångsutrustning, regleras injektionen manuellt medan datainsamlingen görs med dator. Injektionsmätningarna utförs oftast med 2 bars övertryck. Flödesvärden inom området 0.5 ml/min till ca 20 liter/min kan mätas och tryckändringar av storleksordningen 1 cm vattenpelare ska kunna registreras på 1 000 m djup. Mätområdet med avseende på den hydrauliska konduktiviteten är för rörgångsutrustningen ca 10^{-4} – 10^{-11} m/s men denna är beroende av sektionlängd och mättid.

Vid tillgång till hål med så stor diameter att det rymmer en sänkpump kan provpumpningar utföras. En provpumpning utgör liksom en injektionsmätning en hydraulisk störning vars effekt registreras. Oftast pumpar man dock från ett helt borrhål vilket innebär högre kapacitet. Den genomförs dessutom oftast under en

längre period (dagar-veckor-månader). Om flera borrhål finns i närheten mäts grundvattenytan i dessa och med fördel har dessa hål också sektionerats med hjälp av manschetter. Sådana mätningar benämns interferensmätningar eller mellanhålsmätningar och har den stora fördelen att den speglar de hydrauliska förhållandena inom ett större område. En särskild form av mellanhålsmätningar har provats i berglabsprojektet där pumpningen skedde från manschettavtätade borrhålsavsnitt i de tidigare beskrivna teleskopborrhålen med grov övre del /8-13/. Med denna speciella form kan man på ett säkrare sätt söka klarlägga om sprickzoner har hydrauliskt samband mellan de olika borrhålen.

Inom berglabsprojektet har en ny hydraulisk metod prövats för första gången /8-12/. I samband med pumpning ur kärnborrhålen har man utfört flödesloggning, se Figur 8-2. Flödesloggning innebär att man sänker ner en sond med inbyggd propeller eller annan flödes sensor för att mäta den vertikala strömningen i borrhålet. Denna sonds upplösning är inte tillräcklig för att ge utslag för naturliga vertikala strömmar, men genom att använda den i samband med pumpning kan man detektera de borrhålsnivåer (sprickor eller sprickzoner) där vatteninströmning sker. Metoden har visat sig mycket användbar för att snabbt få kvalitativa data



Figur 8-2 Flödesloggning i samband med pumpning indikerar vattenförande sprickor eller sprickzoner.

på borrhålens konduktiva delar. Dess upplösning beror på borrhålens diameter och pumpkapacitet, men för 56 mm borrhål kan partier med en transmissivitet större än 10^{-7} m²/s detekteras.

Grundvattentryck

Grundvattnets tryck kan mätas på flera olika sätt och med flera olika syften. Det kan bland annat mätas genom lodning av grundvattenytan i ett öppet borrhål. I djupa borrhål manschetteras ofta flera borrhålssektioner av så att grundvattentrycken kan mätas i varje inneslutna sektion. Syftet kan dels vara att registrera det naturliga grundvattentrycket och dels att mäta hur grundvattentrycket påverkas av hydrauliska störningar såsom provpumpningar i närheten. Oavsett syftet är det oftast lämpligast att använda sig av automatiskt registrerande utrustning för att mäta grundvattentryck. Vanligen används tryckgivare vars värden lagras på en datalogger. Grundvattnets tryckgradient utgör den drivande kraften för grundvattnets strömning och ofta är denna gradient liten varför stor noggrannhet krävs vid mätning. Ibland måste man ta hänsyn till vattnets densitet vilken framförallt bestäms av vattnets salthalt.

SKB har tagit fram tre olika loggersystem särskilt avsedda för grundvattentryckmätningar. Den ena är speciellt avsedd för långtidsregistreringar av en tryckyta, och programvaran är så uppbyggd att endast förändringar lagras i minnet. En annan är speciellt avsedd för de tidigare beskrivna teleskophålen, där upp till 10 st trycknivåer kan mätas. I båda fallen är loggern placerad i borrhålet vilket medför att temperaturen hålls konstant och därmed minimeras sådana fel som orsakas av elektronikens temperaturberoende. En tredje logger är särskilt lämpad när tryckgivare i flera borrhål ansluts till en gemensam datalogger. I samtliga fall är noggrannheten bättre än 1 cm vattenpelare. Automatisk mätning möjliggör så täta mätintervall att exempelvis dygnsfluktuationer i grundvattenmagasinen kan upptäckas, såsom tidvatteneffekter orsakade av sol och måne.

Ibland behöver man skärma av olika hydrauliska enheter i kärnborrhål med manschetter utan att för den skull göra kontinuerliga tryckmätningar. För vanligt kärnborrhål, utan teleskopdel, har en speciell anordning utvecklats som möjliggör tryckmätningar i alla sektionerade avsnitt. Denna består av en manuell styrd borrhålsventil, till vilken en tryckgivare kan dockas med vilken man kan mäta en sektion i taget. Även vattenprover kan tas på detta sätt.

Grundvattenflöde

För bestämning av grundvattnets naturliga flöde har utvecklats en metod, som innebär att man till en avgränsad borrhålssektion tillsätter ett färgspårämne. I takt med att grundvattnet strömmar genom mätsektionen späds färgämnet ut. Denna utspädning registreras hela tiden med hjälp av en transmissionsmätare, som är den viktigaste delen i den kompletta sk utspädningssonden, som också ombesörjer spårämnesdoseringen och vattenomblandning i mätsektionen. Metoden är användbar i mätsektioner där den hydrauliska konduktiviteten är ca 10^{-10} m/s och större /8-14/. Mät-

gränsen är dock också beroende av den hydrauliska gradienten samt borrhålsdiameter och sektionens längd. Låg vattenomsättning ger lång mättid.

I berglabsprojektet är samtliga borrhål utrustade med manschetter och utspädningssonden kan ej utnyttjas. En annan metod för utspädningmätningar kommer därför att användas. Från några av de manschetterade sektionerna leds dubbla slangar upp till markytan så att vattnet i sektionen kan cirkuleras runt. Genom att tillsätta ett färgspårämne och vid provtagning analysera utspädningen av detta kan vattnets naturliga strömning bestämmas. Man kan dock i detta sammanhang ej mäta så låga omsättningshastigheter som med utspädningssonden.

8.2.2.5 Vattenkemiska mätningar i borrhål

Vattenprovtagning och analys

Vattenprovtagning och analys av vattnets kemiska innehåll kan göras vid flera tillfällen under ett borrhålsprogram /8-15, 16/. Olika typer av provtagningar är lämpliga för olika syften och ger resultat med olika noggrannhet.

Provtagning kan göras vid hydrauliska stigningsmätningar i samband med såväl hammarborrning som kärnborrning. Dessa prover har fördelen att de ger information om vattnets kemiska sammansättning i ett tidigt skede men ur kvalitetssynpunkt är proverna kontaminerade av bl a syre och har ofta en hög andel spolvatten. Andra tillfällen för vattenprovtagning är i samband med provpumpningar.

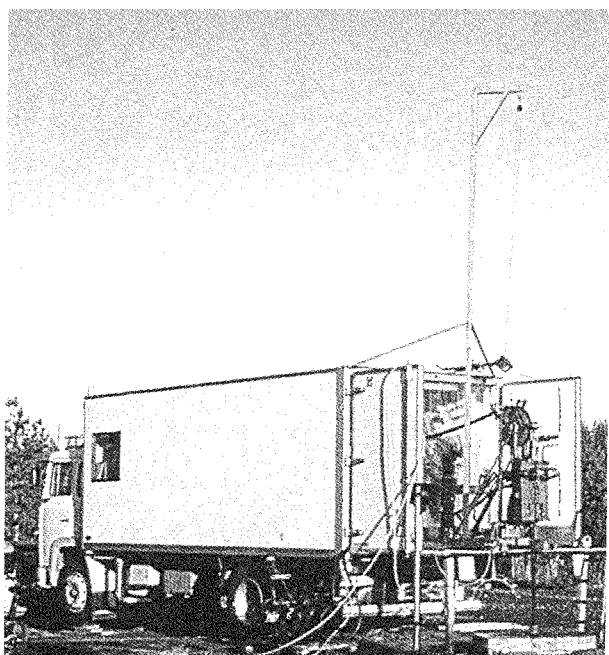
Särskild kemiprovtagnings görs med det av SKB utvecklade mobila fältlaboratoriet /8-5/. Provtagningen går till så att en provtagningspump sänks tillsammans med manschetter ner i ett kärnborrhål. Vattnet som pumpas från den avgränsade sektionen leds genom en mätcell som är utrustad med elektroder för mätning av Eh och pH. Uppe vid markytan passerar det en andra mätcell där även syrehalt och vätskekonduktivitet mäts. Till mätutrustningen hör ett kemilaboratorium där de flesta relevanta ämnena analyseras. Just denna direkta analys på provtagningsplatsen i kombination med registrering av pH, Eh och ibland också sulfidhalt nere i hålet ger hög kvalitet på framförallt bestämningen av vattnets redoxförhållanden och dess innehåll av redoxkänsliga ämnen.

De gaser som eventuellt finns lösta i grundvattnet avgår till stor del i gasform när vattnet pumpas till ytan och trycket sänks. För att komma tillrätta med detta har en speciell provtagningscylinder tagits fram. Denna placeras nere i borrhålet vid pumpen och efter en tids pumpning fylls den med vatten och förseglas. I detta skick lyfts provtagningscylindern sedan upp och transporteras till gaslaboratorium för kvantitativ analys av de gaser som avgått från vattnet.

Den provtagningspump som används för det mobila fältlaboratoriet har låg kapacitet, ca 120 ml/min. Den drivs hydrauliskt och kräver därför relativt omfattande kringutrustning. Det torde idag vara möjligt att utveckla ett förenklat pumpsystem med större pumpkapacitet.

Spårförsök

Spårförsök kan användas dels för geometrisk karakteriseringen av vattenledande sprickor och sprickzoner och dels för att bestämma dessa strukturers transportegenskaper. Mätmetoden går ut på att i en eller flera punkter (borrhål eller borrhålssektioner) dosera ut ett spårämne och i en eller flera andra punkter provta och analysera mängden dittransporterat spårämne. Försöken kan genomföras med den naturliga gradienten som enda pådrivande kraft men vanligen pumpar man ur



provtagningshålet och ibland tillsätts spårämnena med övertryck i doseringshålet.

En enkel typ av spårförsök görs i samband med borrning genom att tillsätta spårämne i spolvattnet. Om pumpning sker i ett angränsande hål kan eventuellt genombrott av spårämne registreras /8-17/. Detta kan vara en lämplig preliminär metod vid exempelvis en målinriktad studie av enskilda sprickzoner, och har använts i SKBs sprickzonsförsök i Finnsjön. Spårämnes-tillsats i spolvattnet är dessutom värdefull vid bedömning av kvaliteten hos senare vattenprovtagningar.

Metodik för särskilda spårförsök har utvecklats och provats bl a i Stripa /8-18/ och Finnsjön.

8.2.2.6 Bergspänningsmätningar

Två principiellt olika metoder för bestämning av bergspänningar i borrhål finns, dels överborrningsteknik och dels hydraulisk spräckning. Båda metoderna har under senare tid genomgått en väsentlig utveckling.

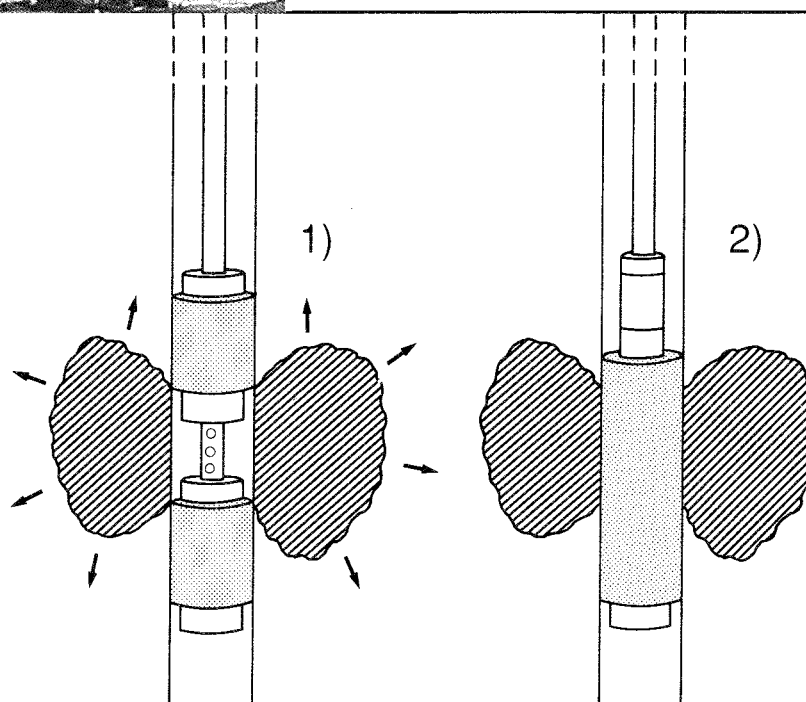
Överborrningstekniken går till så att man i samband med borrning av ett hål gör ett avbrott för mätning. Ett mindre pilothål borras i vilket man monterar mätgivare av trådtöjningstyp. Sedan borrar man ur en provcylinder omkring pilotborrhålet med de monterade givarna. Bergets spänningar kan på detta sätt bestämmas i tre dimensioner. Det senaste utvecklingssteget innebär att en borrhålslogger hela tiden registrerar givarnas utslag medan överborrningen sker.

Den hydrauliska spräckmetoden går ut på att man i befintliga borrhål spräcker upp en ny spricka i berget. Man mäter sedan vilket vattentryck som erfordras för att hålla sprickan öppen samt vilken riktning sprickan har, se Figur 8-3. Utrustningen liknar den hydrau-

Högttryckspump
och mätsystem
monterat i lastbil

1) högt vattentryck
spräcker berget

2) avtrycksmanschett
och kompass mäter
sprickans riktning



Figur 8-3 Mobil utrustning för bergspänningsmätningar genom hydraulisk spräckning. Utrustningen kan användas ner till 1000 m djup i 56 mm borrhål eller grövre.

liska injektionsutrustningen av typ multivagn som tidigare beskrivits, men högre tryck erfordras /8-19/. Sprickornas riktning bestäms med en avtrycksman-schett och borrhålskamera med lutningsgivare och kompass.

8.2.2.7 Positionsbestämningar i borrhål

För varje använd mätmetod måste mätpunktens eller mätsektionens läge bestämmas. Normalt mäter man endast djupet längs borrhålet. Vid större krav på noggrannhet måste man också mäta in borrhålets lutning och hur det kröker utmed sin längd. Sådan krökningsmätning utförs i samband med geofysisk loggning, oftast med en borrhålssond som innehåller kompass och lutningsmätare. En annan metod bygger på att man med fotografisk teknik registrerar ett pilotrörs böjning när det förs ner längs hålet. Noggrannheten i mätningen av borrhålets avböjning är ca 1 m i ett 1000 m långt hål.

God noggrannhet vid dessa mätningar är extra viktig då olika mätresultat ska jämföras med varandra, särskilt vid statistiska korrelationsstudier. Mätningar med höga krav på positionsbestämning är olika slag av mellanhålsmätningar. Även detaljerade förundersökningar inför underjordsbyggande kräver god 3-dimensionell positionsbestämning. De olika mätsonderna sänks ner på olika typer av bärare, rörgång, loggningskablar, multislanger etc; även vid noggrannheter av 0,5% är osäkerheten 5 m på 1000 m djup. Begränsade förstudier har gjorts av en teknik att märka borrhålen på bestämda djup för att senare med varje använd mätmetod kunna kalibrera djupmätningen.

8.2.3 Mätmetoder och instrument för undersökningar från tunnlar och schakt

Många av de mätmetoder och instrument som beskrivits under avsnitt 8.2.1 och 8.2.2 kan användas även vid undersökningar i tunnlar och schakt eller i hål borrade från sådana underjordskonstruktioner. För SKBs del kommer sådana undersökningar framför allt att genomföras i samband med de detaljerade platsundersökningarna. Undersökningar från tunnlar ger möjlighet till mera påtagliga studier av större underjordiska bergytter i jämförelse med borrhål från markytan. Samtidigt är användbarheten av sådana bergytter i en större bergvolym beroende av tunnelsystemets 3-dimensionella utbredning; enbart schakt ger härvid en begränsad tillgänglighet.

Följande sammanställning av kunskapsläget inom detta område begränsar sig till sådana metoder som är särskilt lämpade för undersökningar från underjordskonstruktioner. Kunnandet är baserat dels på de samlade erfarenheterna inom svenskt bergbyggande och dels mera direkt på de projekt som SKB drivit eller deltagit i — CLAB, SFR, Stripa och Hylte.

Geologisk kartering

Geologisk kartering av underjordsanläggningar kan göras med olika ambitionsnivå beroende på syftet med

karteringen. Vid detaljerad dokumentation är det av största värde att så tidigt som möjligt efter varje sprängsalva göra en kartering; framför allt gäller detta tunnelfronten som vid nästa salva kommer att sprängas bort. Kartering vid tunnelfronten ställer stora krav på samplanering med tunnelarbetena. Begränsade metodstudier har genomförts i samband med drivandet av en kraftverkstunnel vid Hylte.

Prediktion av vattenförande sprickzoner

I samband med tunneldrivning är det av flera skäl i hög grad angeläget att kunna prediktera vattenläckage in till tunneln. Beroende på förundersökningarnas detaljeringsgrad har man från dessa fått en uppfattning om presumtiva flödeszoner. Från tunnelfronten kan man borra pilothål som ger direkta svar på förhållandena i området närmast fronten. Prediktioner kan också göras med indirekta geofysiska mätmetoder eller genom en successiv ökad kunskap om den aktuella bergvolymen. Exempel på indirekta geofysiska metoder som bör kunna användas är radar och seismik, där utvecklingspotentialen bedöms avsevärd.

Geohydrologiska undersökningar

Geohydrologiska undersökningar är i många fall enklare att genomföra under jord eftersom man genom passiva åtgärder kan orsaka hydrauliska störningar, vars respons man mäter och utvärderar. Tunnelsystemet är i sig själv en hydraulisk störning vars effekter dock kan vara svåra att kontrollera, speciellt om konstruktionen har en komplex geometrisk utformning. Kan man genom noggrann registrering av bl a vatten-tryck följa skeendet ger dock undermarksbyggen en unik möjlighet till geohydrologisk karakterisering.

Tidigare har nämnts kartering av inläckande vatten i tunnelväggen, som en viktig del av den totala karakteriseringen. I borrhål från en tunnel kan olika slags mätningar göras, av vilka flödesmätningar åtföljda av tryckuppbyggnadsmätningar är de vanligaste. Alla borrhål, inklusive pilotborrhålen, i den mån dessa ej sprängts bort, bör tätas med manschetter så att det inestängda vattentrycket kan registreras /8-20/. Detta möjliggör bl a enklare former av mellanhålsmätningar. Genom en noggrann dokumentation av alla pågående aktiviteter som kan störa den hydrologiska bilden finns det också goda möjligheter att göra en hydrogeologisk detaljkarakterisering av bergvolymen. För särskilda studier, såsom olika typer av mellanhålsmätningar, har mera avancerade metoder och instrument utvecklats exempelvis inom Stripa-projektet /8-21/.

Mätningar av till tunneln inläckande vatten kan göras dels genom att sk mätvallar konstrueras tvärs över tunnelbotten på lämpliga avstånd. Inflödet inom varje tunnelsektion mäts vid ett sk mätöverfall vid varje mätvall. Det är viktigt att dessa vallar tätas ner genom den i samband med sprängningen uppluckrade tunnelbotten, annars passerar en del av vattnet under mätvallarna.

För noggrannare mätning av inläckage genom tunnelväggar och tak kan dessa sektioneras och kläs in med plast, vilket provats i Stripa-projektet. Vid låga inflöden för ventilationsluften bort en stor del av vattnet.

Detta kan kontrolleras genom att ett tunnelavsnitt helt skärmas av och luftfuktigheten hos inströmmande respektive utströmmande ventilationsluft mäts; se ventilationsförsök.

Hydrokemiska undersökningar

Liksom det är viktigt att ha kontroll över hur grundvattnetrycket är fördelat och ändras i samband med underjordsarbeten är det viktigt att ha samma kontroll över grundvattnets kemi. Provtagningen från manschetterade borrhål under jord är mycket enkel att utföra och används såväl för vattenkemisk analys som vid spår-försök. Vid spår-försök kan såväl naturliga spårämnen såsom salthalt- och redoxförhållanden som artificiellt tillsatta spårämnen användas.

Bergmekaniska undersökningar

I samband med undermarkskonstruktioner är det nödvändigt att beakta de bergmekaniska parametrarna. För mätning och registrering av bergspänningar och deformationer finns ett stort antal metoder och instrument tillgängliga. Särskilt intressanta är metoder, där man undersöker bergspänningarnas inverkan på de geohydrologiska parametrarna. Detta kan göras i stora bergblock som helt eller delvis frilagts från bergvolymen.

Vid undersökningar i berggrum måste man beakta att området närmast bergväggen är kraftigt stört på grund av dels ökad sprickbildning från sprängningen och dels ändrade spänningsförhållanden. De särskilda egenskaper som gäller för detta område, skinzonen, kan ha stor betydelse för säkerhetsanalysen och kräver ytterligare studium.

8.3 FORSKNINGSPROGRAM 1990-1995

Den verksamhet som planeras inom metod- och instrumentutveckling för åren 1990—1995 har anknytning antingen till SKBs berglabsprojekt eller till de kommande detaljundersökningarna. Utvecklingsprojekten presenteras under ämnesområdesrubriker, på samma sätt som ovan för "nuvarande kunskapsläge", även om metod- och instrumentutvecklingen, där så är möjligt, strävar mot utvecklandet av "multidisciplinära" metoder och instrument. Denna strävan medför både kostnads- och tidseffektiva undersökningar.

Installationer och system för datainsamling i berglabsprojektet måste vara så utformade att de uppfyller högt ställda krav på noggrannhet, funktion och driftsäkerhet, men även på flexibilitet avseende utbyggbarhet, anslutning av alternativa mätgivare samt varierande mätintensitet.

Där ej annat nämns gäller att beskrivna mätmetoder och instrument är planerade för 56 mm borrhål och användning i 1000 m långa borrhål. Begränsningen 56 mm diameter är oftast en minimidiameter, varför även borrhål med större diameter kan utnyttjas.

Mätningar på större djup än 1000 m kan genomföras i borrhål från tunnlar t ex i berglaboratoriet. Utveckling av mättekniken för längre borrhål än 1000 m be-

döms som komplicerad men är för den skull ej omöjlig att genomföra.

8.3.1 Geologiska mätmetoder och instrument

Borrning

Under rubriken för nuvarande kunskapsläge beskrivs en alternativ kärnbörningsmetodik med vilken man reducerar inträngningen av borrhax och spolvatten i bergformationen. För en annan metod, kärnbörning med omvänd spolning har en begränsad förstudie gjorts. Teknikens förutsättningar och svårigheter har definierats, och i nästa steg avses en provbörning med omvänd spolning genomföras. Vid hammarbörning, och då främst vid pilot- eller sonderingsbörning i tunnlar, utgör borrhåstekniska parametrar såsom borsjunkningshastighet, spoltryck, spolflöde etc, viktiga underlag för bedömningen av bergarter, spricksystem o d. Automatisk registrering av sådana parametrar ökar känsligheten vid sådan datafångst och kommer att provas. Även vid kärnbörning bör liknande registreringssystem avsevärt underlätta bokförandet av sådana parametrar.

Tunnelkartering

Tunnelkartering kommer under kommande programperiod att genomföras i mycket stor omfattning i samband med att berglaboratoriet byggs. Denna kartering kommer att genomföras under kortare och längre uppehåll i bergarbetena, men också ända framme vid tunnelfronten efter varje sprängsalva. För att karteringen ska bli väl genomförd under de besvärliga förhållandena som råder krävs mycket god samplanering med bergarbetena samt att tekniska hjälpmedel används. Sådana hjälpmedel är t ex utrustning och metodik för enkel inmätning och fotodokumentation. Dator teknik som hjälpmedel vid tunnelkartering kommer att utvecklas och möjligheter för inläggning av karteringsresultat i CAD-system kommer att utredas. Ett sådant CAD-system ska kunna användas dels som ett verktyg vid tolkning av sprickzoner och andra strukturer och dels för presentation av överskådliga volymritningar.

Kartering av borrhärlar och borrhål

Under denna rubrik nämns utvecklingen av ett nytt borrhåls-TV system. Med detta system ska 1 000 meter djupa borrhål med 56 mm diameter kunna inspekteras. Detta kan användas för orientering av sprickor men också för visuella undersökningar av borrhålsväggen. Möjlighet till vidareutveckling på bildbehandlingsidan för att förenkla sprickorienteringen kommer därefter att undersökas.

Positionsbestämningar i borrhål

Under motsvarande rubrik i avsnitt 8.2.2.7 beskrivs problematiken kring absoluta 3-dimensionella positionsbestämningar i borrhål. Den förstuderade meto-

den att placera ut märkningar i borrhålen på bestämda djup, för att senare i samband med borrhålmätningar detektera desamma, i syfte att kalibrera dessa metoders djupmätningssystem undersöks vidare.

8.3.2 Geofysiska mätmetoder och instrument

Radar

Vad det gäller borrhålsradarn är utvecklingen av riktantenner i det närmaste avslutad. Detta arbete som bedrivits inom Stripa-projektet har resulterat i en antenntyp med tillfredsställande funktion. SKB arbetar för närvarande vidare på att göra denna antenntyp till ett fältmässigt instrument för mätningar från markytan. Bl a innebär detta att noggranna orienteringsgivare måste integreras i borrhålssonden. Vidare är det angeläget att gå ett steg längre inom bearbetnings- och presentationstekniken.

Antennerna är radarns viktigaste komponent. Frekvensen kan ändras för att erhålla varierande upplösning och räckvidd. Vidare är antennerna speciellt utformade för att ge bästa kontakt med berggrunden. Således kommer speciella antenner att krävas för mätningar direkt i tunnlar. Extra höga krav ställs på att sådana tunnelantenner ej är känsliga för störning från olika tunnelinstallationer. Utveckling av antenner anpassade för mätningar direkt från tunnlar har nyligen startat. Radarsystemet kommer att utformas så att även mätningar från tunnel till borrhål och vice versa ska kunna göras.

I samband med tunnelbyggnad borde radarmetodiken kunna utnyttjas som ett verktyg för att prediktera eventuella zoner framför tunnelfronten, bl a med hjälp av en tunnelradarversion av den seismiska metoden VSP.

Seismik

Borrhålsseismik är en mätmetod som använts av SKB inom det internationella Stripa-projektet. Metodiken, borde även provas inom andra projekt. Seismik är i likhet med radar lämplig att använda inom berglabprojektets byggnadsskede.

8.3.3 Geohydrologiska mätmetoder och instrument

Hydrauliska mätningar

Den inom berglabsprojektet provade metoden att genomföra flödesloggning i samband med provpumpning kommer att vidareutvecklas framförallt med avseende på flödesloggerns mät noggrannhet. Inom Stripa-projektet kommer såväl aktiva som passiva hydrauliska mätningar att genomföras i olika skalor. Speciell utrustning för automatiskt genomförande av dessa mätningar har utvecklats och kommer att provas. Inom Stripa-projektet studeras också hur vattnets strömningsvägar är fördelade i ett spricksystem, sk kanalströmning. Särskild utrustning konstrueras för att ut-

föra detaljmätningar längs sprickan. Såväl enhåls- som mellanhålsmätningar ska genomföras.

Grundvattentryck

Inom berglabsprojektet förses alla borrhål med ett flermanschettssystem när de inledande borrhålmätningarna har genomförts. Syftet är dels att undvika kortslutning mellan olika hydrauliska enheter och dels att kunna mäta tryck och ta vattenprover i de avskärade sektionerna. Mätssystemet för detta är speciellt anpassat för de i berglabsprojektet teleskopborrade hålen. Motsvarande mätsystem har tagits fram även för 56 mm kärnborrhål av standardtyp. Detta system är utformat så att någon som bor i närheten av mätplatsen ska kunna användas för att göra avläsningar. Detta sätt att genomföra långtidsregistreringar ska provas i några borrhål i exempelvis Finnsjön.

Grundvattenflöde

Den under avsnitt 8.2.2.4 beskrivna utspädningssonden för mätning av grundvattnets omsättningshastighet i en borrhålssektion kan användas i borrhål med 76 mm diameter och större. Vidareutvecklingen av denna utrustning (bl a för användning i 56 mm borrhål) har länge varit planerad och kommer att genomföras under den närmaste treårsperioden. Den andra metodiken som beskrivits, att genom ett cirkulationssystem i de manchettinstallerade teleskopborrhålen genomföra utspädningsmätningar, har visserligen sämre upplösning, men kommer att användas i berglabsprojektet i relativt stor omfattning.

Mätningar i tunnlar

Vid hydrauliska mätningar under jord (från tunnlar) skapar man vanligen en hydraulisk störning genom att t ex låta vatten flöda ur ett borrhål. Tryckstörningen mäts med det system som installerats i borrhålen.

En underjordsanläggning i form av tunnlar och/eller schakt, som berglaboratoriet, kommer i sig att utgöra en storskalig störning på det naturliga grundvattenmagasinet. För att tillgodogöra sig all den information som en sådan störning kan ge måste man under byggnadsskedets gång bygga ut ett mätsystem för tryck och flöde. Tryck kommer huvudsakligen att mätas i borrhål. Störningen ska också ha föregåtts av en längre tids registrering av naturliga förhållanden, vilket är fallet i berglabsprojektet. Tryckmätningar är känsliga för variationer i vattendensitet som i sin tur huvudsakligen beror på salthalt och temperatur. Berggrundens temperatur har i detta fall betraktats som konstant medan salthalten kan ändras pga de störningar och vattenuttag som anläggningen medför och måste därför hållas under uppsikt. Flöde kommer bl a att mätas i borrhål. Inläckande vatten till anläggningen kommer att noga kontrolleras, huvudsakligen genom ett system av mätvallar. Större vattenläckage i tunnelväggar och tak kommer att mätas separat. För att få en totalbild av vatteninläckaget i vissa delar kan man komplettera med att även mäta ventilationsluftens fukttransport. För genomförande av dessa mätningar kommer lämpliga instrument att tas fram.

8.3.4 Kemiska mätmetoder och instrument

Vattenprovtagning

Rutinen att i samband med andra mätningar också ta vattenprover där så är möjligt kommer att anpassas till en effektiv nivå. Den provtagningspump som används vid det mobila fältlaboratoriet har låg pumpkapacitet och kräver omfattande kringutrustning. En ny provtagningspump med större kapacitet och enklare hantering ska därför utvecklas. För långtidsprovtagning i de sk teleskopborrhålen krävs en särskild vattenprovtagare.

Inom berglabsprojektet kommer ett flertal nya kemiska undersökningar att genomföras, vilket kräver såväl anpassning av befintliga som utveckling av nya mätmetoder och instrument. Bl a kommer utrustning för registrering av redoxpotential och andra känsliga parametrar att installeras permanent eller anslutas tillfälligt till borrhål.

Spårförsök

Spårförsök kommer att genomföras och vidareutvecklas under kommande programperiod, bl a inom berglabsprojektet. I de multimanschetterade borrhålen ska doseringar kunna utföras med samma utrustning som tagits fram för utspädningsmätningar.

Under berglaboratoriets byggnadsetapp kommer anläggningens dränerande inverkan på bergvolymen att utnyttjas som ett storskaligt spårförsök. Genom den rutinmässiga vattenprovtagningen och installationen av registrerande mätceller för Eh, pH etc, kommer

naturliga spårämnen som redoxfront och saltvattenfront liksom artificiellt tillsatta spårämnen att utnyttjas. Kring sprickzoner och i bergmassan runt dessa har vidare planerats särskilda spårförsök då även sorberande ämnen ska användas. För detta kommer mättekniken att vidareutvecklas.

Det är eftersträvansvärt att finna en enkel teknik för kvalitativa bestämningar av spårämnes inläckage i sprickor eller sprickzoner som passeras av tunneln. En förstudie av detta kommer att vara genomförd innan berglaboratoriets byggnadsetapp inleds. Målsättningen är att med hjälp av ultraviolettt ljus detektera fluorescerande spårämnen som tränger in i tak och på väggar och att prova dokumentationsteknik i form av fotografering och filmning.

Inom Stripa-projektet kommer också olika typer av spårförsök att genomföras. Bland annat kommer valideringen av uppsatta prediktioner att genomföras med hjälp av spårförsök, dels saltvatteninjektion med provtagning och radarmätning och dels spårämnesinjektion med provtagning av till tunneln inströmmande vatten.

8.3.5 Bergmekaniska mätmetoder och instrument

Under berglaboratoriets utbyggnad kommer ett bergmekaniskt undersökningsprogram att genomföras. Detta innebär att bergmekaniska parametrar såsom spänningar och deformationer kommer att registreras. Mätssystem för detta ändamål kommer att tas fram så att det svara mot de speciella krav som sätts upp i nämnda undersökningsprogram.

9 UNDERJORDISKT BERGLABORATORIUM

9.1 BAKGRUND OCH MOTIV FÖR BYGGANDE AV UNDERJORDISKT BERGLABORATORIUM

De vetenskapliga undersökningarna inom SKBs forskningsprogram ingår i arbetet med att utforma ett slutförvar och att utse och undersöka en lämplig plats. Genomförandet kräver omfattande fältstudier beträffande samspelet mellan olika tekniska barriärer och omgivande berg.

En sammanvägning av de fakta, krav och värderingar som gjordes vid utarbetandet av FoU-program 86 ledde till förslaget om byggande av ett underjordiskt berglaboratorium. Detta förslag presenterades i nämnda forskningsprogram och fick ett mycket positivt mottagande av remissorganen.

SKB påbörjade hösten 1986 fältarbeten för lokalisering av ett underjordiskt berglaboratorium till Simpevarpsområdet i Oskarshamns kommun. I slutet av 1988 fattade SKB ett principbeslut om lokalisering av anläggningen till södra Äspö ca 2 km norr om Oskarshamnsverket. Byggstarten är planerad att ske under 1990 under förutsättning att berörda myndigheter ger sitt godkännande.

De viktigaste motiven för ett berglaboratorium är:

- verifikation av metoder för yt- och borrhålsundersökningar,
- utprovning av metoder för detaljerade platsundersökningar med schakt- eller tunneldrivning,
- möjlighet att i realistisk miljö och i stor skala undersöka förhållanden som är viktiga för säkerheten t ex grundvattenflöde och därtill kopplad transport av lösta ämnen,
- möjlighet att i realistisk miljö genomföra demonstrationsförsök och långtidsförsök av växelverkan mellan tekniska barriärer och berg,
- metodutveckling för bergarbeten, avfallshantering och återfyllning.

Dessa motiv utvecklas närmare i det följande.

Hittills genomförda undersökningar av tänkbara slutförvarsplatser, de sk typområdena, har endast avsett mätningar på markytan och i borrhål. Därutöver har undersökningar gjorts i och från tunnlar i Stripa och vid vissa anläggningsarbeten för andra ändamål. Det finns ett behov att direkt verifiera resultat från yt- och borrhålsundersökningar med systematiska observationer från schakt och tunnlar ned till det djup som kan bli aktuellt för ett slutförvar. Byggandet av ett berglaboratorium ger utmärkta möjligheter till en sådan verifikation.

De detaljerade undersökningar av kandidatplatser som planeras under senare delen av 1990-talet kommer att innehålla undersökningar av berget från schakt och

tunnlar på förvarsnivå. Dessa detaljerade platsundersökningar omfattar de fältundersökningar och analyser som skall ge den slutliga bekräftelsen på att en vald plats är lämplig för slutförvaring av långlivat och högaktivt radioaktivt avfall. Undersökningarna skall även ge tillräckliga data för anpassning av förvaret till den valda platsen och för en analys av den långsiktiga säkerheten hos det så anpassade förvaret. Denna analys skall ingå i en lokaliseringsansökan och visa att platsen fyller kraven i kärntekniklagen. Tekniken för genomförande av sådana undersökningar har delvis utvecklats och provats i Stripa. Eftersom Stripa är en övergiven gruva kan emellertid inte alla aspekter på tekniken provas där.

Prov på ett tidigare ostört område ger ytterligare möjligheter att utveckla och finlipa metoderna innan de s a s används ”på riktigt”. På kandidatplatserna är det olämpligt att göra motsvarigheten till vad som i vanligt industriellt utvecklingsarbete kallas ”förstörande” prov. Det är därför viktigt att ha tillgång till ett berglaboratorium där man kan utföra sådan provning.

Det centrala och samtidigt besvärligaste problemet i analysen av slutförvarets långsiktiga säkerhet är flödet av grundvatten i bergets spricksystem och den därtill kopplade transporten av ämnen som är lösta i grundvattnet. Mycket omfattande insatser har gjorts och görs för att belysa detta problem.

Den fortsatta forskningen bör framförallt ägnas åt att knyta ihop och komplettera den bild som man fått genom de hittillsvarande undersökningarna på olika ställen. Ett första sådant hopknytningsförsök görs inom fas 3 av Stripa-projektet i en ”Site Characterization and Validation test” (SCV) i en bergvolym i 100 m-skala. Inför lokaliseringen av slutförvaret behöver liknande hopknytning ske i större skala för att stärka det experimentella underlaget för den långsiktiga säkerhetsanalysen. Det är en fördel att göra ett sådant storskaligt prov vid ett berglaboratorium.

När man i mitten på 1990-talet har valt en principutformning för slutförvaret behöver man prova de olika delar som ingår i detta system i en realistisk skala. Speciellt viktigt är att pröva och demonstrera växelverkan mellan tekniska barriärer och berg i en så riktig miljö som möjligt. I första hand blir det fråga om långtidsförsök och demonstrationsförsök i fullstor eller representativ skala. Även ”förstörande” prov kan bli aktuella. Detta är ytterligare motiv för byggande av ett berglaboratorium.

Inför byggandet av slutförvaret måste man utveckla och verifiera de metoder och den teknik som behövs bl a för att bygga tunnlar och förvarsutrymmen, för att exakt bestämma var avfallet skall placeras, för att hantera avfallet i berg, för att deponera avfallet på avsedd plats samt för att återfylla och försegla förvarets olika delar. Alla dessa aktiviteter måste genomföras med jämn dokumenterad kvalitet för att tillgodose säker-

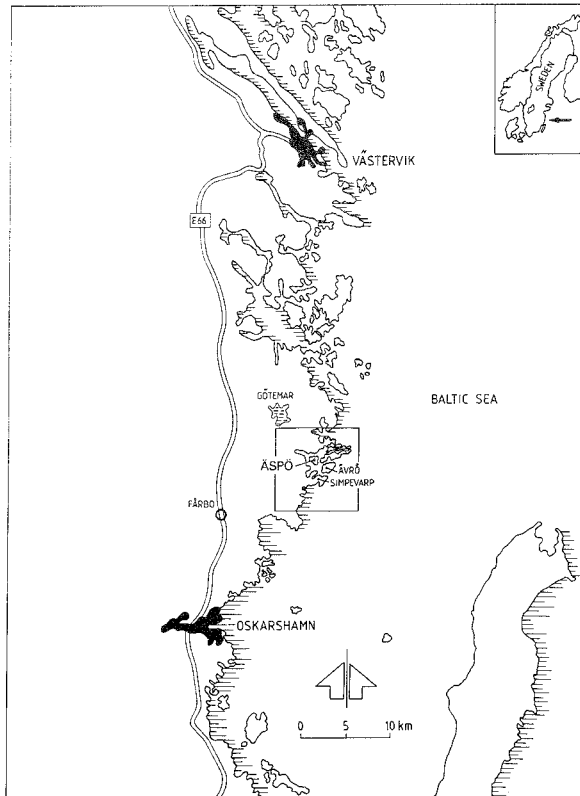
hetskraven. Många av dessa moment kan utvecklas och provas i ett berglaboratorium. Tillgång till ett sådant ger goda förutsättningar att möta kvalitetskraven.

9.2 LOKALISERING OCH UTFORMNING AV BERGLABORATORIET

I FoU-program 86 konstaterades att ett nytt berglaboratorium bör lokaliseras till en ort där man har befintlig service och annan för forskningsarbetet nödvändig infrastruktur. I första hand borde något av kärnkraftslägena, lämpligen Simpevarp i Oskarshamns kommun, undersökas.

Undersökningar i Simpevarpsområdet inleddes under hösten 1986 och har sedan fortsatt i relativt stor omfattning 1987, 1988 och våren 1989. På grundval av erhållna resultat har SKB fattat ett principbeslut om lokalisering av berglaboratoriet till södra Äspö, se Figur 9-1. Äspö har av främst följande skäl befunnits vara en lämplig plats för berglaboratoriet.

- Kravet på ostörda förhållanden i berggrunden och grundvattnet kan tillgodoses. Genom placeringen av ett berglaboratorium i ett område undantaget från industrietablering torde man också kunna påräkna att annan verksamhet inte stör forskningen under den tid som krävs för vissa långtidsförsök.
- Äspö har inom ett geografiskt begränsat område tillgång till de olika geologiska och hydrologiska förhållanden som krävs för planerade försök och för utvärdering av dessa. Genomförda undersökningar av berggrunden på Äspö visar en lämplig variation mellan partier med bra berg och sprickzoner av olika karaktär. Grundvattnets sammansättning är representativt för svenskt berg vid kusten och ger möjligheter till studier av rådande förhållanden och förändringar av dessa till följd av bygget.
- Närheten till Oskarshamnsverkets anläggningar på Simpevarpshalvön gör att behovet av byggnader i marknivå minimeras. Inom nära avstånd finns tillgång till serviceanläggningar och personal som kan utnyttjas för verksamheten. Oskarshamnsverkets

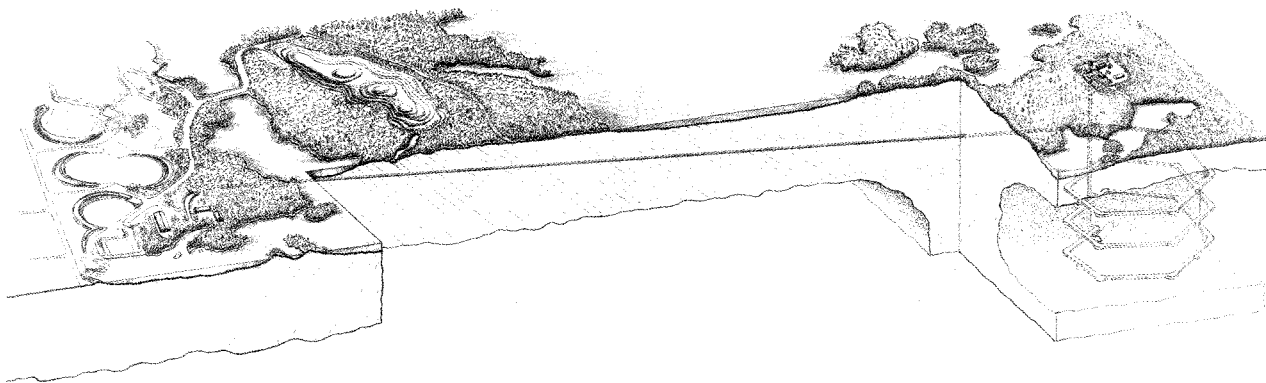


Figur 9-1 Äspö med omgivningar.

olika anläggningar är också lämpliga för t ex stationering av forskare, möten m m. Att OKG äger det aktuella markområdet underlättar upplåtelsen av erforderlig mark.

Lokaliseringen förutsätter godkännande från berörda myndigheter vilket beräknas ske under 1990.

Själva platsen för berglaboratoriet, Äspö, kommer inte att bli aktuell för lokalisering av slutförvaret. Om man emellertid finner lämpliga geologiska förhållanden i närheten så kan detta bli en av de kandidatplatser som detaljundersöks inför den slutliga lokaliseringen av slutförvaret.



Figur 9-2 Preliminär utformning av berglaboratoriet.

Under 1987 genomfördes studier av alternativa utformningar för berglaboratoriets underjordsdel. En tunnelramp befanns vara att föredra före en schakt-sänkning till ca 500 m djup. Tunnelalternativet valdes främst med hänsyn att det ger bättre flexibilitet samt större möjlighet till insamling av data och karakterisering av bergmassan. I Augusti 1989 beslutade regeringen att berglaboratoriet skulle prövas enligt Naturre-surslagen. I anslutning därtill har SKB beslutat göra en viss ändring av laboratoriets utformning som minskar miljöeffekterna. Den nya utformningen framgår av Figur 9-2, där tunnelns påslag placeras på Simpevarp istället för som tidigare planerat på Äspö. Denna tillfartstunnel kommer också att ge möjligheter att studera de zoner som indikerats mellan Simpevarp och Äspö.

9.3 MÅLSÄTTNING OCH TIDPLAN

Mot bakgrund av de motiv som redovisats i avsnitt 9.1 har SKB beslutat att anlägga ett underjordiskt berglaboratorium med syftet att skapa en möjlighet till forskning och utveckling i en realistisk och ostörd bergmiljö ned till det djup som planeras för det framtida slutförvaret.

Berglaboratoriet skall utgöra ett viktigt komplement till det övriga arbete, som bedrivs inom SKBs forskningsprogram.

Kraven på forskningens kvalitet är hög och en övergripande ambitionsnivå bör vara att berglaboratoriet utvecklas till ett internationellt ledande centrum för forskning och utveckling rörande anläggning av slutförvar för högaktivt avfall.

FoU-verksamheten i berglaboratoriet har som huvudmål att:

- pröva kvalitet och användbarhet för olika metoder att karakterisera berggrunden med avseende på förhållanden av vikt för ett slutförvar,
- vidareutveckla och demonstrera metoder för hur ett slutförvar vid projektering och byggande skall kunna anpassas till bergets lokala egenskaper,
- ta fram underlag och data av betydelse för slutförvaringens säkerhet och för tilltron till säkerhetsanalysernas kvalitet.

Det sista målet är generellt för SKBs hela forskningsprogram.

För att uppfylla den övergripande tidplanen för SKBs forskningsarbete har följande etappmål ställts upp för verksamheten vid berglaboratoriet.

Inför lokaliseringen av slutförvaret för använt bränsle i mitten av 1990-talet skall man med verksamheten vid berglaboratoriet:

1 Verifiera förundersökningsmetoder

- demonstrera att undersökningar på markytan och i borrhål ger tillräckliga data om väsentliga säkerhetsrelaterade egenskaper hos berget på förvarsnivå, samt

2 Fastställa detaljundersökningsmetodik

- färdigutveckla och verifiera de metoder och den teknik som behövs vid karakterisering av berget i de detaljerade platsundersökningarna.

Som underlag för en bra optimering av slutförvarssystemet och för en säkerhetsanalys inför lokaliseringsansökan, som planeras till ett par år efter 2000 behöver man:

3 Pröva modeller för grundvattenströmning och transport av lösta ämnen

- färdigutveckla och i stor skala på förvarsdjup pröva metoder och modeller för bestämning av grundvattenflöde och transport av lösta ämnen i berg.

Inför byggandet av slutförvaret, som planeras starta år 2010, skall man på aktuellt förvarsdjup och under representativa förhållanden

4 Demonstrera bygg- och hanteringsmetoder

- ge tillgång till berg där man kan vidareutveckla och pröva teknik för att säkerställa hög kvalitet i byggande, utförande och drift av slutförvar, samt

5 Pröva viktiga delar i förvarssystemet

- i full skala pröva, undersöka och demonstrera olika komponenter som har betydelse för långtids-säkerheten hos ett slutförvarssystem.

Dessa prov ska kunna ske i tillräcklig omfattning vad avser tid och skala för att ge underlag för myndighetsgodkännande av byggstart. Vissa prov kan därför behöva starta i mitten av 90-talet.

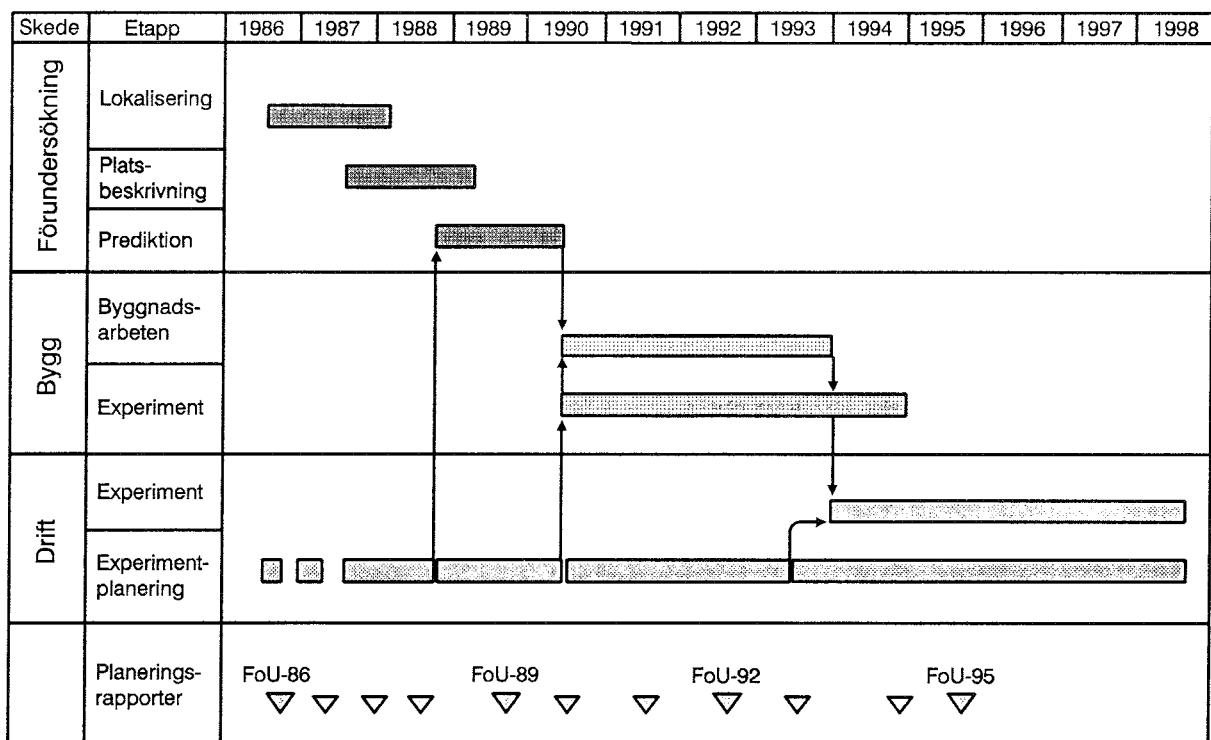
De egenskaper i berget som är av vikt i olika skeden kommer att variera. Den prövning av kvaliteten hos metoder för bergkarakterisering som görs vid berglaboratoriet anknyter i ett tidigt skede till förmågan att på basis av förundersökningar kunna tolka grundvattens strömning och kemi på möjligt förvarsdjup. Allteftersom beslutsprocessen fortgår och allteftersom prognosmodellerna och säkerhetsanalyserna detaljeras kommer specifika krav att ställas på detaljinformationen.

Arbetet med berglaboratoriet indelas i tre skeden, förundersöknings- byggnads- och driftsskedet, som framgår av tidplanen i Figur 9-3.

I förundersökningsskedet sker lokalisering av berglaboratoriet. De naturliga förhållanden i berggrunden beskrivs. Parallellt med förundersökningarna sker planering för projektets byggnads- och driftskede.

Under byggnadsskedet 1990-1994 genomförs flera undersökningar och försök parallellt med byggnadsverksamheten. Utbyggnaden av tunneln ned till 500 m nivå sker i etapper.

Driftsskedet inleds 1994. I detta program anges inriktningen på de undersökningar och försök som genomförs under driftsskedet. Det slutliga programmet för driftsskedet ska anpassas till resultat från andra projekt och till erfarenheter från byggnadsskedet.



Figur 9-3 Underjordiskt berglaboratorium. Översiktlig tidplan.

9.4 UTFÖRDA UNDERSÖKNINGAR I FÖRUNDESKEDET

Undersökningar av berggrunden sker både från markytan och i borrhål. Data sammanställs i beskrivande modeller som underlag för lokalisering av laboratoriet, utformning av anläggningen och som underlag för bl a numeriska beräkningar av grundvattnets strömning i olika skalor.

Förundersökningsskedet är indelat i etapperna:

- lokalisering,
- platsbeskrivning och
- prediktion,

varav de första två har genomförts och rapporterats.

Undersökningarna påbörjades hösten 1986 och studier har genomförts i flera olika skalor, både regionalt och lokalt. Arbetet inriktades relativt omgående på en lokalisering nära Simpevarpsområdet, som har en bra infrastruktur för den planerade verksamheten.

De genomförda undersökningarna har visat att det på Äspö norr om Simpevarp finns gynnsamma förutsättningar för att anlägga ett berglaboratorium av vilka följande kan nämnas.

- Ett homogent bergblock med få väldefinierade grundvattenledande strukturer finns på södra Äspö där nedfarten till laboratoriet kan byggas.
- Inom nära avstånd till ovanstående finns tillgång till en regional skjuvzon och områden med mycket homogen Smålandsgranit.
- Områden under havsytan finns tillgängliga i omedelbar anslutning till Äspö.

Resultaten från lokaliseringsetappen har redovisats i /9-1/. Bergbeskrivningen i regional skala visar att Simpevarpsområdet huvudsakligen består av granitisk berggrund (Smålandsgranit) med inslag av basiska bergarter, grönstenar. Informationen från de geologiska och geofysiska undersökningarna visar en tektonisk bild av Simpevarpsområdet som domineras av ett nästan ortogonalt system av första ordningens sprickzoner i N-S respektive E-W riktning. Vid sidan av detta system finns en andra ordningens zoner i riktning NW och NE som också bildar ett nästan ortogonalt system. Det finns också troligen flacka, subhorisontella zoner.

Av betydelse för numeriska modeller av grundvattnets strömning har varit att Simpevarpsområdet omges av yngre, granitiska sk diapiorer som även antas underlagra Simpevarpsområdet på stort djup. Regionala brunnsdata visar att dessa yngre bergarter är mer vattengenomsläppliga. I lokaliseringsetappen genomfördes även hammarborrprogram på tre områden som gav

underlag till kemisk karakterisering av det ytliga grundvattnet. Det bedömdes att både Äspö och Laxemar var lämpliga platser för ett berglaboratorium, se Figur 9-1.

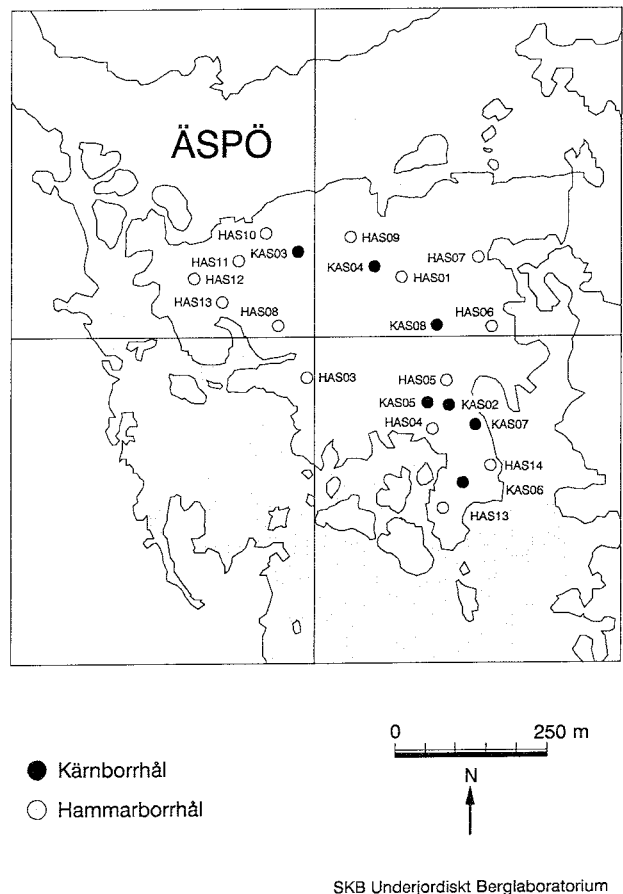
Platsbeskrivningsetappen har redovisats i /9-2/. De fortsatta undersökningarna för lokalisering inriktades framförallt mot Äspö. Laxemar ska utnyttjas som ett referensområde där t ex naturliga variationer i grundvattennivåer kan följas och jämföras med de störda förhållanden som blir på Äspö efter det att laboratoriet är utbyggt. Fyra kärnborrhål har utförts varav de djupaste ned till 1 km djup. Förutom mycket kvalificerad kärnkartering har det genomförts omfattande geofysiska mätningar, hydromätningar i flera skalor och vattenkemianalyser. På Äspö har ingående ytundersökningar genomförts bl a med hjälp av seismiska profiler, hållkartering, markgeofysiska mätningar och interferensmätningar mellan borrhålen. Vid det kärnborrhål som utförts på södra Äspö är Smålandsgraniten dominerande bergart ner till ett djup av drygt 300 m. Under denna blir bergarten en kvartsfattigare variant av smålandsgraniten, benämnd diorit. Ett flertal zoner av olika karaktär finns på Äspö.

Berglaboratoriet har föreslagits lokaliseras till södra Äspö. Äspö ger förutsättningar för vetenskapliga experiment av stort intresse för ett säkert slutförvar. Vidare ger Äspö även bergtekniska förutsättningar för att det kvalificerade anläggningsprojektet kan genomföras med gott resultat. Med hänsyn till framtida försök är det en fördel att olika typer av bergarter och zoner kan studeras i berglaboratoriet. Denna variation finns på Äspö med omgivning.

Vattenkemiska förhållanden på Äspö är också representativa för att studera de förhållanden som råder vid kustnära förläggning av en berganläggning. Grundvattnet är sött i de ytliga delarna och salt på större djup. I platsbeskrivningsetappen har även resultat från flera typer av numeriska beräkningar av grundvattnets strömning genomförts.

Den platsbeskrivning som återfinns i /9-2/ har sedermera kompletterats i prediktionsetappen med bl a ytterligare fyra kärnborrhål, se Figur 9-4. Redovisning av dessa resultat och tillhörande numeriska beräkningar kommer att redovisas i en Teknisk Rapport våren 1990. Prediktioner sätts upp i olika skalor. Dessa kallas regionalskalan, >>1000 m, anläggningskalan, 100—1000 m, blockskalan, 10—100 m och detaljskalan, 0—10 m. För varje skala definieras vilka prediktioner som ska upprättas, en uppskattning av väntat utfall, grund för validering och vilken mätnoggrannhet som eftersträvas. Prediktionerna för varje skala grupperas efter forskningsområden och innebär prövning av beskrivande modeller, vattenomsättning, kemisk miljö, transport av lösta ämnen i grundvatten samt bergets mekaniska stabilitet.

Beräkningar genomförs i olika skalor och jämförs, innan byggnadsskedet påbörjas, mot tryck- och flödesmätningar i borrhål och mot grundvattenkemiska data och då framförallt vattnets salthalt. Under byggnadsskedet utvärderas de geologiska, geohydrologiska och grundvattenkemiska prediktioner som upprättas under prediktionsetappen.



Figur 9.4 Borrhålens placering på Äspö.

För att kontrollera den beskrivande modell som upprättats i Platsbeskrivningsetappen genomförs ett långvarigt pumptest under sommaren 1989. Mätresultaten används för att utvärdera de prediktiva beräkningar som genomförts innan långtidspumpningen. Vidare utnyttjas resultaten för att upprätta den slutliga beräkningsmodell över de grundvattenförändringar som sker då laboratoriet byggs. Ett kvalificerat radiellt spår försök genomförs också innan byggnadsskedet påbörjas. Utvärdering av långtidspumpning och spår försök kommer att redovisas i en Teknisk Rapport under 1990.

Den nya utformning av berglaboratoriet som beslutats (sept 1989), se Figur 9-2, påverkar detaljplaneringen för hur förundersökningsskedet avslutas.

9.5 PROGRAM FÖR BYGGNADSSKEDET

Under byggnadsskedet genomförs undersökningar för att validera förväntningsmodeller som redovisas under förundersökningsskedet. Vidare erhålls data för att stegvis förbättra tidigare utförda prediktioner. Undersökningarna genomförs dels längs nedfartstunnelns ytor, dels i borrhål från markytan och från tunneln. Ef-

tersom egenskaperna hos berggrunden närmast deponeringshål och deponeringstunnlar har relativt sett störst betydelse för säkerheten av ett slutförvar är det väsentligt att detaljeringsgraden av undersökningarna under byggnadsskedet ökas efterhand.

Undersökningarna, som genomförs under drivningen av tunnelnedfarten, delas därför in i etapper.

Laboratoriets huvudnivå läggs ca 500 m under markytan. Om senare undersökningar inom ramen för det allmänna forskningsprogrammet skulle visa att slutförvaret bör förläggas djupare än ca 500 m så kan en utbyggnad av till större djup bli aktuell.

Arbetet under byggnadsskedet är till stor del inriktat på geologiska, geohydrologiska och grundvattenkemiska aspekter.

9.5.1 Geologiska undersökningar

Med hänsyn till geologi finns ett flertal såväl geologiska som geofysiska metoder tillgängliga som hjälp för beskrivning av bergmassans sammansättning och struktur. De olika metodernas relevans såväl generellt som i den lokala geologiska miljön är emellertid mycket ofullständigt dokumenterade. Speciellt gäller detta förhållanden på större djup i kristallin berggrund. De övergripande målen för den geologiska dokumentationen under byggnadsskedet kan därför sammanfattas som att:

- utvärdera i vilken mån den använda förundersökningsmetodik har givit en riktig beskrivning av den rumsliga fördelningen av bergarter, större och mindre sprickzoner samt bergmassans sprickgeometri och -mineral i olika geologisk miljö och för olika djup,
- fastställa olika undersökningsmetoders relevans vad gäller bergarter, strukturer, stabilitet och vattenföring med hänsyn till geologisk miljö och djupläge,
- upprätta en god prognos för den geologiska miljön som påträffas under den andra byggnadsetappen och under utbyggnaden av 500 m-nivån,
- utveckla och pröva metodik för detaljerade geologiska undersökningar på kandidatplatser för slutförvar.

De geologiska förväntningsmodellerna görs i huvudsak med avseende på litologi och strukturer. Prediktioner görs i olika blockskalor för olika geologiska miljöer. Strävan skall vara att definiera olika litologiska enheter samt att beskriva bergmassans struktur avseende orientering och karaktär.

Geologisk dokumentation av tunnlar, schakt och utförda borrhningar kommer att ske successivt i samband med anläggningens utbyggnad. Utfallet jämförs successivt med förväntningsmodellerna som upprättats med ledning av resultat från förundersökningarna.

9.5.2 Geohydrologiska undersökningar

Vad avser geohydrologi finns endast ett fåtal kvalificerade försök som har genomförts för att pröva riktighe-

ten av modeller för grundvattenrörelser i stora bergvolymer. De övergripande målen för de geohydrologiska undersökningarna under byggnadsskedet kan sammanfattas som att:

- utvärdera i vilken mån den använda förundersökningsmetodik har givit en riktig beskrivning av den naturliga grundvattensituationen i olika geologiska miljöer och för olika djup,
- dokumentera de geohydrologiska förhållandena i bergvolymer från tunnlar och bergrum i olika skalor samt ge geohydrologiska driftsprognoser för utsprängningsarbetet,
- iterativt med dokumentationen validera de i skilda skalor uppställda modellerna av berglaboratoriets inverkan på de stationära geohydrologiska förhållandena,
- med de nya data som fortlöpande erhålles under byggnadsskedet stegvis detaljera och förbättra prognoserna över de geohydrologiska förhållandena på de djupare nivåerna,
- validera de uppdaterade förväntningsmodellerna av de geohydrologiska förhållandena på de djupare nivåerna och 500 m-nivån,
- utveckla metodik för detaljerade geohydrologiska undersökningar på kandidatplatser.

För att nå dessa mål fordras liksom under förundersökningsskedet att undersökningar genomförs i fält, att erhållna data analyseras och bearbetas integrerat med de geologiska och grundvattenkemiska undersökningarna, samt att resultaten sätts samman i kvalitativa och kvantitativa modeller. Undersökningarna har en naturlig och avgörande betydelse för bergbeskrivningen av såväl fjärrområde som närområde.

Under utsprängningsarbetet kommer dokumentation av bergarter, sprickighet, förstärkningar m m att utföras. I denna dokumentation införs även registrering av vatteninflöden till kvantitet och läge. Inflödet till tunneln mäts med mätvallar längs tunnelnedfarten. Mätvallarna kommer att vara så konstruerade att inläckande grundvatten i tunnelavsnitten mellan två vallar kan mängdsättas och provtagas.

Ett handlingsprogram för hur de geohydrologiska observationerna skall utföras vid injekteringar och omfattande förstärkningsarbeten kommer att upprättas. I programmet definieras även gränser för när injektering ska ske. Det skall även innehålla riktlinjer för när sidotunnlar skall anordnas.

För att undersöka, beskriva och modellera konduktiva zoner utan att störa och störas av byggprocessen planeras att sidotunnlar tas ut från tunnelnedfarten. En sidotunnel sprängs ut om berg påträffas som kräver stora insatser av tätning och förstärkning.

Från tunnelsidorna i anslutning till fronten hammarborras sonderingshål. I hålen, som riktas snett framåt, utföres tryckuppbyggnadstester och om så erfordras, manschettmätningar. Dessa pilotundersökningar utnyttjas, dels för att tillsammans med dokumenterade data från tunneln ge driftprognoser och dels för att komplettera databasen med geohydrologiska data tagna under jord. Borrhålen kommer dessutom att användas för vattenprovtagning.

Förutom de sonderingshål, som regelbundet borrar vid tunnelfronten, kommer man att komplettera observationsnätet under jord för att karakterisera och mäta trycket i konduktiva zoner. För detta planeras hammarborrhål utrustade med flermanschettssystem längs tunnelsträckningen.

9.5.3 Grundvattenkemiska undersökningar

Under förundersökningsskedet görs undersökningar som syftar till att klarlägga grundvattenkemiska förhållanden i berggrunden. Detta arbete utförs i etapper som växlar mellan mätning, utvärdering och prediktering där de samlade resultaten används för att prediktera förhållandena och de förändringar som förväntas under byggskedet. Eftersom grundvattnet är rörligt kommer en dränering av schakt och tunnlar att åstadkomma en kraftig omsättning av grundvattnet. Således kommer de förändringar som sker i vattensammansättningen att återspegla de geohydrologiska förhållandena. Målsättningen med de grundvattenkemiska undersökningarna under byggnadsskedet är att studera förändringar i vattensammansättningen och att relatera dessa mot de prediktioner som gjorts i förundersökningsskedet. Målen för de geohydrokemiska undersökningarna under byggnadsskedet innefattar därför att:

- följa förändringar i gränsen mellan salt och sött vatten,
- studera transport av upplösta ämnen i en stor volym av berget,
- ge underlag för validering av grundvattenströmning och transportmodeller i realistisk skala,
- följa förändringar i redoxförhållandena hos grundvattnet,
- följa förändringar i den kemiska sammansättningen hos sprickmineral och fastställa redoxkinetiken hos systemet grundvatten-sprickmineral,
- utveckla och pröva metodiker för detaljerade grundvattenkemiska undersökningar på kandidatplatser.

Arbetet omfattar studier av dels förändringar i vattnets kemiska sammansättning (naturliga spårämnen) dels av tillförda vattentrogna spårämnen via borrhål eller genom inläckage till anläggningen. De naturliga spårämnena skall företrädesvis kunna beskriva vattnets flödesvägar i det översta partiet av berget medan de tillsatta spårämnena skall klargöra flödesvägarna i det djupare liggande berget.

För att studera flödesvägarna i det yt nära berget (ca 100 m) kommer sötvattenkudden på Äspö att användas. Pga tryckavsänkning som sker i tunneln kommer sötvatten att rinna ner och nå tunneln i de punkter där förbindelsen uppåt är god. För att studera flödesvägarna i det djupa berget kommer spårämnen att injekteras i konduktiva zoner via de tidigare från ytan borrade kärnborrhålen.

Provtagning av grundvatten kommer att ske i sonderingshål och dräneringsdiken samt med speciella hål i större flödesvägar. Provtagningen i borrhålen syftar

till att klargöra förändringar i vattnets kemiska sammansättning. Dessutom kommer eventuella spolvattenrester från borrhålen av de djupa kärnborrhålen och tillsatta spårämnena att detekteras.

9.6 PRELIMINÄRT PROGRAM FÖR DRIFTSKEDET

Efter byggnadsskedet inleds driftskedet för vilket planeringen inriktas mot att genomföra bl a följande föreslagna försök:

- storskaliga spår försök,
- blockskaliga spår försök,
- blockskaliga redoxförsök,
- metodik för förvarsutbyggnad,
- pilotförsök-förvarssystem.

De storskaliga spår försöken syftar till att karakterisera transport i fjärrzonen. För att studera de platsspecifika flödesvägar som råder i berggrunden kring berglaboratoriet kommer spår försök i skilda skalor att genomföras. Ett storskaligt spår försök startar redan i det stationära skedet före byggstart och pågår under hela det transienta byggnadsskedet. Resultaten från denna undersökning utgör en grund för planeringen av storskaliga spår försök under driftskedet.

Blockskaliga spår försök i medelstor skala, ca 50×50 m. Situationen i ett slutförvar med kapslar deponerade i berg med låg hydraulisk konduktivitet och med respektavstånd till närmast större vattenförande zon kommer att efterliknas i undersökningen. Resultaten från studien kommer att utvärderas och användas för att validera transportmodeller i blockskala dvs över avstånd i skalan 10—100 m. Undersökningen skall också visa på vår förmåga att karakterisera och välja ut bra partier av berget för deponering. Med hjälp av transportmodeller prövas möjligheten att prediktera migration av upplösta ämnen i ett utvalt parti lågkonduktivt berg intill en sprickzon.

Blockskaliga redoxförsök genomförs för att visa att bergets redoxkapacitet är tillräcklig i flödesvägarna. Reducerande förhållanden på förvarsdjup är ett nödvändigt krav för kapselns långa livslängd. Det grundvatten som provtagits vid olika tillfällen och på olika platser inom typområdesundersökningarna har alltid visat sig vara reducerande. Kinetiken i redoxreaktionerna mellan berggrundens mineral och grundvattnet behöver dock belysas ytterligare. Under byggnadsskedet, då oxiderande vatten kommer ner i anläggningen, finns det möjligheter att studera dessa reaktioner. Undersökningen av effekten av det syresatta vattnet kommer att utföras i block-skala (några 10-tal meter), vilket möjliggör kontroll av samtliga ingående parametrar samtidigt som möjlighet ges till en bedömning av hastigheten i utbytesreaktionerna.

Metodik för förvarsutbyggnad syftar till att demonstrera hur utbyggnad av ett förvar ska ske. I samband med byggandet av ett slutförvar är det nödvändigt att genomföra ett antal undersökningar för att få slutligt underlag för utformning av förvaret, försegling av förvaret och för att få underlag för den slutliga säkerhetsanalysen av det utbyggda förvaret. Genomfö-

andet av undersökningarna är beroende på valet av system för slutförvaret.

Pilotförsök-förvarssystem är en serie av pilot- och demonstrationsförsök som genomförs efter det att huvudprinciperna för förvarsutformning och -system fastlagts i mitten av 90-talet. Målet för försöket är att genom klarläggande av samverkan mellan berg och slutgiltigt valda buffertar, under förhållanden som råder i deponeringsanläggningar, validera modellerna och demonstrera funktionen. Vidare är syftet att utveckla och pröva metoder och strategier för deras anbringande.

9.7 ÖVRIGT

Detta kapitel ger endast en sammanfattning av forskningsprogrammet för berglaboratoriet. En betydligt fylligare redovisning lämnas i en särskild underlagsrapport till FoU-program 89 och som utges samtidigt med detta. Programmet kommer fortlöpande att detaljeras och uppdateras mht de erfarenheter och resultat som kommer fram under byggnadsskedet. Det ovan redovisade programmet för driftskedet är preliminärt och kommer att utarbetas mer i detalj i samband med kommande treårsprogram.

10 STRIPA-projektet

10.1 MÅL SAMT HITTILLS ERHÅLLNA RESULTAT

Det internationella Stripa-projektet startade med Fas 1 vilken genomfördes under åren 1980-1985, följd av en Fas 2, som påbörjades 1983 och som i huvudsak avslutades under 1986. Forskningen inom dessa två faser har bedrivits inom i huvudsak följande fyra huvudområden.

- Geohydrologiska undersökningar av Stripagraniten samt migrationsförsök på nuklider i enkla och komplexa spricksystem.
- Kemiska undersökningar av grundvattnet i Stripagraniten.
- Teknik för att upptäcka samt karakterisera spricksystem i granit.
- Studium av bentonitlera för användning som återfyllnads- och tätmassa i en sprickfylld berggrund.

Nu pågående arbeten i Stripa faller inom Fas 3, som startade hösten 1986 och skall avslutas 1991.

10.1.1 Kortfattade resultat från Fas 1

Fas 1 av Stripa-projektet innefattade utvecklingen av metoder och teknik för undersökning av berget vid en försvarsplats. Vidare ingick att via fältförsök verifiera tidigare erhållna laboratorieresultat.

Resultaten från de geohydrologiska undersökningarna samt vattenkemiprovtagningen utmynnade i en rekommendation som innebär att hydrologiska undersökningar bör utföras på försvarsdjup. Vidare konstaterades att en detaljerad kunskap om vattnets kemiska sammansättning, samt orsakerna till denna, inte kan kartläggas utan en samordnad insats genom flera undersökningstekniker.

Ökad kunskap erhöles om vattenströmning samt nuklidmigration i enstaka sprickor. Denna kunskap medförde i sin tur en ökad tillförsikt till tidigare gjorda prediktioner vad gäller nuklidretardation. Försöken visade vidare att diffusion av radioaktiva nuklider in i bergets matrix samt sorption till sprickytorna är processer vilka aktivt påverkar hastigheten hos nuklidmigrationen.

Vad gäller buffertmaterial visade försöken att vi nu kan beskriva och förstår bentonitens fysikaliska egenskaper samt att vi kan förutsäga dessa för olika utformning av slutförvaret. I detta sammanhang spelar bentonitens vattenupptagande och svällande egenskaper en stor roll. Vidare visades att vi har teknik för att preparera och applicera bentoniten som buffertmaterial.

10.1.2 Kortfattade resultat från Fas 2

Fas 2 av Stripa-projektet innebar en vidareutvecklingen av metoder och teknik för undersökning av berget vid en slutförvarsplats.

Ett mellanhållsmätningssystem visade på att teknik nu finns vilken möjliggör karakterisering av sprickzoner i kristallint berg med en säkerhet och detaljnivå som tidigare inte varit möjlig. Genom geofysiska undersökningarna visades att flödet av grundvatten är koncentrerat till ett fåtal större sprickzoner. Dessa sprickzoner betraktas förenklat vara plana med en varierande hydraulisk konduktivitet utmed sprickplanet.

Detaljerade undersökningar av vattenströmning samt spårämnesmigration i sprickor har givit ytterligare ökad kunskap. Arbetet i Stripa har visat att kunskap finns för att insamla och analysera data om bergmassans strukturer samt hydrauliska egenskaper. Härigenom kan, som ett led i en säkerhetsanalys, förhållandena vid en tänkt slutförvarsplats jämföras med förhållandena vid en annan plats.

Genomförda migrationsförsök gav, tillsammans med tritiummätningar, stöd för teorin att en del av vattenflödet i sprickor sker i mer eller mindre väldefinierade kanaler och att dessa sinsemellan har liten kontakt. Ytterligare forskning är dock nödvändig då det gäller att utveckla numeriska modeller vilka beskriver vattenflödet i en sprucken bergmassa.

Tättnings- och pluggningsförsöken i Stripa visade att teknik och material finns för att omfördela vattenströmmarna i en sprucken bergmassa bort från utsprängda orter och schakt. Under försvarslika förhållanden visade sig högkompakterad natriumbentonit vara ett passande material för att plugga borrhål, orter och schakt. Den hydrauliska konduktiviteten hos dessa pluggar är, efter det att bentoniten tagit upp vatten från det omgivande berget och svällt, betydligt lägre än konduktiviteten hos den omgivande bergmassan. En speciellt viktig egenskap hos bentoniten är dess förmåga att tillsammans med berget skapa integrerade täta pluggar vilket effektivt förhindrar vattenströmning i kontaktzonen mellan berg och plugg. Bentonitens speciella fysikaliska egenskaper gör att dess tätande egenskaper består även om bergmassan skulle komma att utsättas för spänningsomlagringar med åtföljande bergdeformationer.

Resultaten från faserna 1 och 2 har visat att avgörande steg har tagits när det gäller utvecklingen av metoder och teknik för att detaljundersöka berget vid en tänkt försvarsplats, samt när det gäller ingenjörstekniska lösningar för tätning av bergmassan. Resultaten från det arbete som gjordes inom Fas 1 och 2 finns sammanfattade i /10-1/ respektive /10-2/.

10.1.3 Mål för Fas 3

Fas 3 av Stripa-projektet innebär en tillämpning av resultat samt en vidareutveckling av teknik från Fas 1 och 2. Arbetsinriktning samt mål för Fas 3 kan kortfattat sammanfattas som att:

- tillämpa olika typer av förundersökningstekniker samt metoder för analys av resultaten för att prediktera och validera grundvattenströmning samt nuklidtransport inom en ostörd bergvolym i Stripa gruva,
- prova och visa olika typer av material samt teknik för att täta vattenledande sprickor i Stripagraniten.

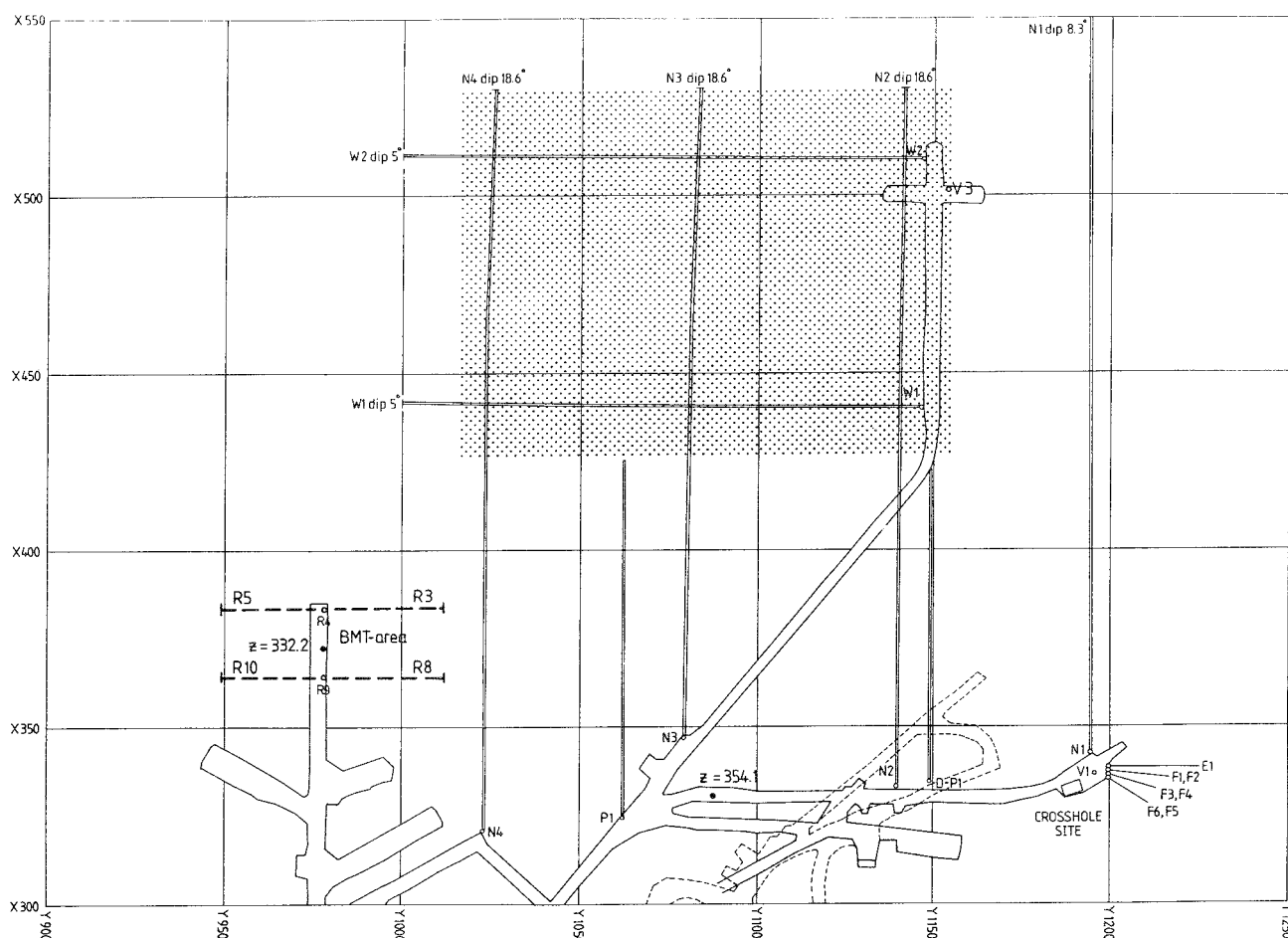
Fas 3, vilken påbörjades under 1986 och löper till utgången av 1991, syftar alltså till att tillämpa hittills vunna erfarenheter på en ostörd granitisk bergvolym i Stripa gruva. Inom Fas 3 kopplas den tidigare utvecklade mättekniken till ett matematiskt modellarbete, så att teoretiskt beräknade värden kan jämföras med de i fält uppmätta. Parallellt med detta sker en vidareutveckling av teknik för fältmätningar. Då det gäller de ingenjörstekniska lösningarna till tätning av berget gäller det nu att finna lämpliga metoder för injektering samt att bestämma långtidsegenskaperna för material för tätning av sprickor etc., /10-3/.

10.2 NUVARANDE PROJEKT-LÄGE SAMT FORSKNINGSPROGRAM 1990-1992

Resultaten från Stripa-projektet avrapporteras fortlöpande genom projektets egen rapportserie samt arrangerade workshops. Ett Stripa symposium arrangeras under 1989. Ett ytterligare Stripa symposium kommer sannolikt också att arrangeras efter projektets slut 1992. Uppnådda resultat granskas kontinuerligt och forskningsinriktningen för det fortsatta arbetet diskuteras i en teknisk kommitté, Technical Sub Group, TSG, sammansatt av representanter från projektets medlemsländer.

Forskning inom Fas 3 indelas i följande tre huvudområden:

- "Site Characterization and Validation"; genom stegvisa undersökningar följda av en sammanställnings- och prediktionsfas karakteriseras och slutligen valideras en begränsad bergvolym och dess egenskaper.
- "Improvement of Site Assessment Concepts and Methods"; fortsatt utveckling samt förbättring av den teknik och de metoder för undersökning och



Figur 10-1 SCV-områdets utsträckning och läge i plan, samt de under steg 1 av SCV-programmet borrade N- och W-hälens läge.

karakterisering av berg som påbörjades under fas 1 och 2.

- "Sealing of Fractured Rock"; prova och utvärdera långtidsstabiliteten hos material som kan användas för att täta sprickor i berget samt utveckla teknik för att injektera dessa material i bergets sprickor.

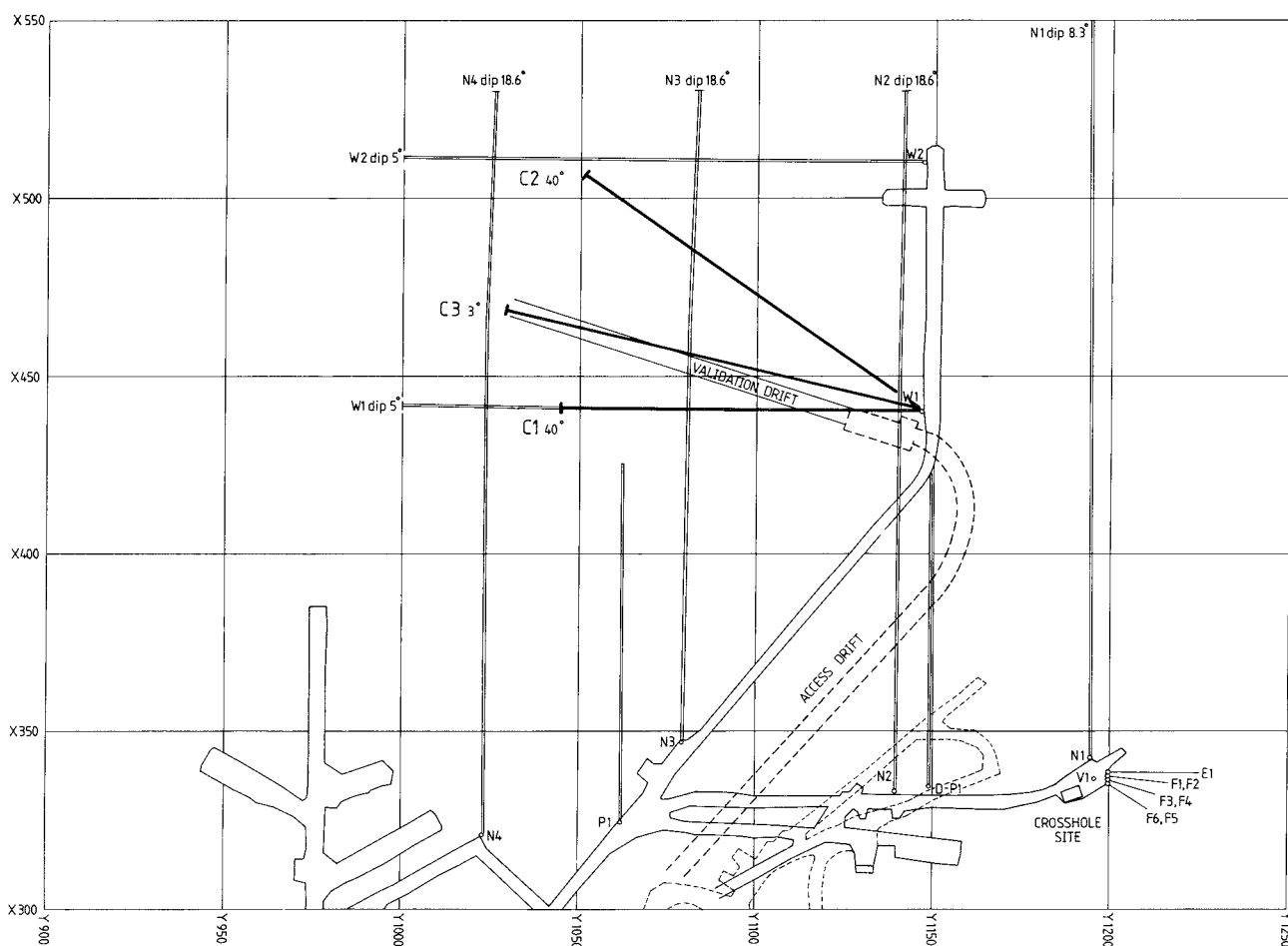
10.2.1 "Site Characterization and Validation"

SCV-programmet är uppdelat i fem delsteg:

Steg 1. Inledande undersökningar. Den bergvolym (SCV-området) om $125 \times 125 \times 50$ meter på 360 meters nivån i Stripa gruva som innefattas i undersökningsprogrammet, har under Steg 1 undersökts genom sex borrhål, de sk N- och W- hålen. Dessa borrhål har placerats på ett sådant sätt att de geologiska, hydrologiska, geofysiska, hydrokemiska samt bergmekaniska undersökningar som utförts i borrhålen skall ge en så heltäckande bild som möjligt av bergmassans egenskaper, se Figur 10-1. Förutom borrhålsundersökningarna har angränsande orter karterats med avseende på sprickornas frekvens, orientering samt egenskaper. Vidare har ett system för mätning av vattentrycket i alla

de borrhål vilka omger SCV-området installerats. Det är av stor betydelse vid tolkningen av de hydrologiska förhållandena inom SCV-området att förhållandet vid områdets ränder är kända. Avrapportering av samtliga undersökningar i Steg 1 har gjorts i Stripa Rapporterna /10-4 — 10-15/. Under Steg 1 drevs också den 180 meter långa tillfartsort som leder fram till gränsen för SCV-området. Slutpunkten för denna ort kommer i senare steg av programmet att användas som utgångspunkt för vidare undersökningsborrningar respektive påhuggspunkt för den sk valideringsorten.

Steg 2. Första prediktionen. Baserat på det material som insamlats under Steg 1 har en modell utarbetats vilken beskriver SCV-områdets förväntade geologiska, hydrologiska samt hydrokemiska egenskaper. Sålunda har ett antal sprickzoner identifierats vilka genomkorsar området. Dessa zoner har bekräftats genom ett antal olika geofysiska mätmetoder. Zonerna är inte alla nödvändigtvis vattenledande utan endast vissa av de definierade zonerna har kunnat identifieras som hydrauliska zoner. Modellen av SCV-området kompletteras av de bergspänningsmätningar som utförts i nära angränsning till området. Denna prediktion eller förväntningsmodell av området, baserat på undersök-



Figur 10-2 De under steg 3 av SCV-programmet borrhållade C-hålen samt tillfartsorten till den sk Validation Drift. Validation Drift kommer att drivas under steg 5 av SCV-programmet.

ningarna i Steg 1, finns dokumenterad i Stripa Rapporten /10-16/. Rapporten beskriver inte bara den slutgiltiga på Steg 1 baserade konceptuella modellen utan tar även upp det bakomliggande resonemang vilket lett fram till den föreslagna modellen.

Steg 3. Detaljerad undersökning samt validering av den i Steg 2 gjorda prediktionen. Baserat på den i Steg 2 framtagna förväntningsmodellen genomförs under Steg 3 ett förnyat undersökningsprogram. Programmet innehåller till väsentliga delar samma typer av undersökningar som genomförts under Steg 1, dock med den stora skillnaden att tre nya borrhål, de sk C-hålen som borras in i SCV-området under Steg 3, placeras för att så långt möjligt ge information som kan bekräfta den modell av området som sammanställts i Steg 2, se Figur 10-2. Mätningarna i dessa borrhål slutfördes under första hälften av 1989. Steg 3 omfattar även borring av de sex sk D-hålen. D-hålen är ca 80 meter långa och borras inom en cirkel med diametern 2,5 meter. Intensionerna är att den valideringsort som drivs under Steg 5 av SCV-programmet skall ha en diameter som överensstämmer med den cirkel som omskriver D-hålen. Även D-hålen utnyttjas för att bekräfta modellen från Steg 2 respektive för att inhämta ytterligare information om SCV-området. I D-hålen, liksom C-hålen, utförs hydrauliska mellanhålmätningar liksom mätning av det från det omgivande berget inströmmande vattnet. Dessa inströmningsmätningar i D-hålen används förutom i SCV-programmet även i det numeriska modelleringsprogrammet för att kalibrera respektive, för en av modellerna, göra en preliminär prediktion av vatteninströmningen till valideringsorten, vilken drivs i Steg 5. De sprickzoner som har betydelse för vatteninströmningen till D-hålen kommer att karakteriseras med hjälp av radarmätningar efter saltinjektering i de vattenförande zonerna.

Steg 4. Detaljerad prediktion. Baserat på det material som insamlats under Steg 3 uppdateras nu den modell som beskriver SCV-områdets förväntade geologiska, hydrologiska samt hydrokemiska egenskaper vilken togs fram i Steg 2. Detta arbete genomförs under senare delen av 1989.

Steg 5. Slutlig utvärdering. Den i Steg 4 framtagna modellen över SCV-området kommer att utvärderas genom att en valideringsort med en längd på ca 75 meter drivs in i SCV-området, se även Figur 10-2. Denna ort förväntas korsas en eller flera av de sprickzoner som identifierats med hjälp av de olika borrhålmätningarna. I orten bestäms, förutom vatteninflödet och dess fördelning, sprickfördelningen samt de med geofysiska metoder identifierade sprickzonernas fysikaliska egenskaper. Vidare kommer en förnyad radarmätning med saltinjektering att göras för att utvärdera om de i Steg 3 lokaliserade vattenvägarna är stationära eller om vattnet valt nya vägar efter ortdrivningen. Detta kommer att ge oss en viss uppfattning om den störda zonen kring valideringsorten samt riktlinjer för injicering av spårämnen i de avslutande spår försöken. Spår försöken skall ses som en uppföljning till de migrationsförsök som gjordes i den sk 3-D orten inom Fas 2 pro-

grammet. Spår försöken kommer att fortgå tom första halvåret 1991 och kommer därmed att avsluta fältdelen av SCV-programmet.

10.2.2 "Improvement of Site Assessment Concepts and Methods"

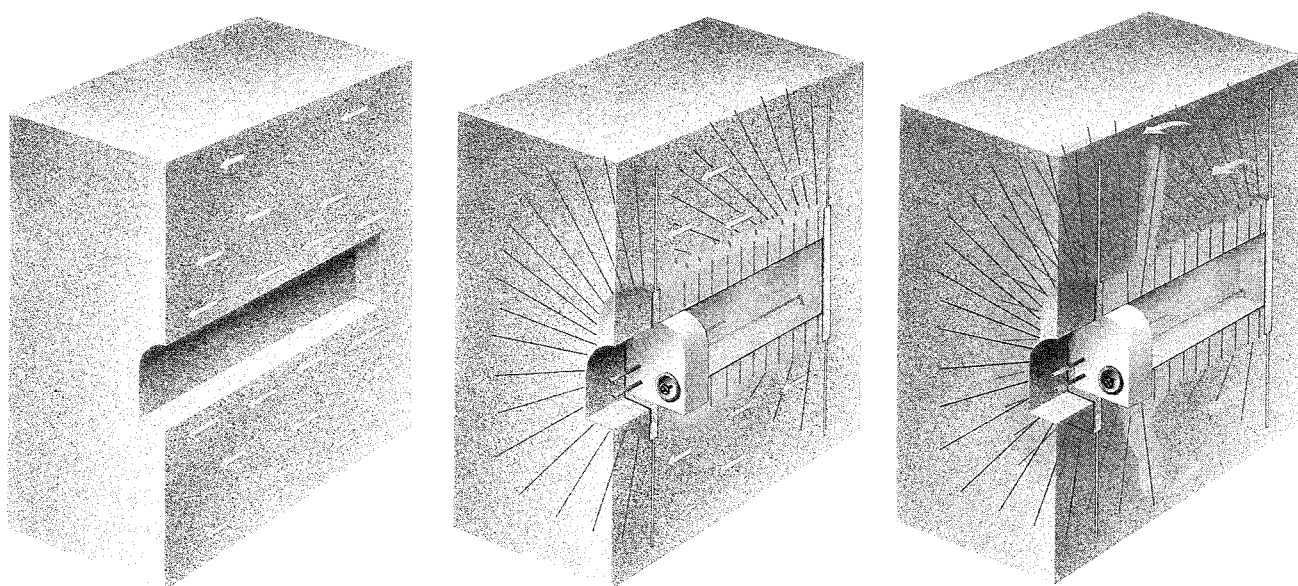
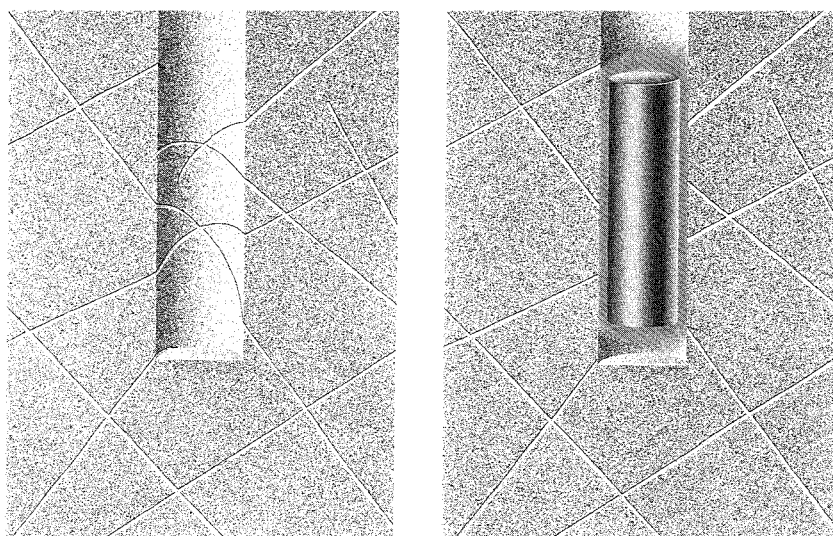
Programmet är uppdelat i fem delprogram:

- **Utveckling av riktanten för borrhålsradar.** Det nya riktantenssystemet möjliggör bestämning av en sprickzons orientering genom mätning i ett enstaka borrhål. Tidigare teknik innebar att man var tvungen att utnyttja två borrhål för att bestämma en sprickzons orientering. Denna utveckling förbättrar avsevärt borrhålsradarteknikens användbarhet trots att radarns räckvidd försämras något då den nya antennen används. Utvecklingen av riktanten till borrhålsradarn är i det närmaste avslutad och kommer att avrapporteras under 1989.
- **Vidareutveckling av teknik för seismisk mellanhålmätning.** Vidareutvecklingen av tekniken för seismisk mellanhålmätning har framförallt skett inom två områden; utveckling av en ny typ av signalkälla, samt utveckling av teknik för bearbetning och tolkning av resultaten från mätningarna. Den nya signalkällan alstrar en högfrekvent koherent signal. Denna typ av signal ger en bättre upplösning vid de seismiska mätningarna vilket underlättar tolkningen av resultaten. Bearbetningen och tolkningen av mätresultaten underlättas genom förbättrade algoritmer för utvärderingen. Vidare har en omskrivning av den kod som används för vektoranalys gjorts. Arbetet med vidareutveckling av teknik för seismiska mellanhålmätningar kommer att pågå fram till senare delen av 1991.
- **Nätverksmodellering för vattenströmning i berg.** Finansierad med Stripamedel pågår vid Harwell i England utvecklingen av en sk diskret nätverksmodell för simulering av vattenströmning och transport i berg. Parallellt med detta arbete pågår också en utveckling av liknande modeller vid LBL i Kalifornien samt vid Golder i Seattle, USA. Detta arbete finansieras direkt av US DOE men kommer Stripa-projektets medlemsländer tillgodo. Alla tre grupperna arbetar med diskret nätverksmodellering, men utifrån olika koncept vad gäller sprickornas generering samt representation i modellen. En sk Task Force med experter från Stripa-projektets medlemsländer har bildats för att ge stöd och synpunkter samt koordinera gruppernas arbete. På gruppens initiativ kommer de olika koderna att verifieras genom att jämföra resultaten från bearbetning av identiska standardproblem. All modellutveckling tillämpas på ingångsdata från SCV-området i Stripa gruva. En validering av modellerna kommer också att göras mot data från valideringsorten. Valideringen tillgår i korthet så att de olika grupperna predikterar mängden samt fördelningen av det vatten som förväntas strömma in till valideringsorten. Dessa prediktioner jämförs sedan mot verkligt uppmätta värden.

— **Kanalströmningsförsök.** De grundläggande tvådimensionella försöken som utfördes under Fas 1 visade att vattnet fördelas ojämnt över sprickplanet och att strömningen i ett sprickplan förenklat kan beskrivas ske i "kanaler" vilka bildats genom de båda sprickytornas oregelbundna form. Sprickytorna har kontakt med varandra över större eller mindre sektioner av den totala sprickytan och däremellan bildas stråk, kanaler, i vilka vattnet strömmar, /10-17, 18/. Fas 3 innefattar en fortsättning på dessa försök i syfte att få kanalströmningsfenomenet ytterligare belyst. Fenomenet studeras i två olika typer av försök, sk enkelhåls- respektive dubbelhålsförsök. I enkel-

hålsförsöken, som omfattar ca tio borrhål, bestäms frekvensen av kanaler samt avståndet mellan kanalerna i ett sprickplan. I dubbelhålsförsöken studeras bl a hur kanalerna är sammanlänkade och om vatten från olika kanaler blandas i sprickplanet. Resultaten från de två första enkelhålsförsöken visar att två sprickor kan, trots att de ser likartade ut när man studerar dem på ortväggen, ha helt olika vattenledningsegenskaper. Kanalströmningsförsöken avslutas under 1989.

— **Sprickors hydrauliska längd och vidd.** Detta för Fas 3 nya forskningsområde syftar till att genom enkelhålsmätningar få information om bl a sprickors hydrauliska längd samt kopplingar till spricksystem



Figur 10-3 Försök 1 omfattar tätning av berget närmast deponeringshålen. Efter injektering av berget placeras värmare i hålen. Dessa värmare simulerar det utbrända bränslet påverkan på den tätade bergmassan.

Figur 10-4 Försök 2 och 3 omfattar tätning av den störda zonen kring en deponeringstunnel. Cementinjektering av berget görs för att tätta berget närmast tunneln.

som inte korsar det borrhål vilket utnyttjas för mätningarna. Experimenten utförs genom att vattenförlustmätningar görs i ett borrhål under det att hålet står under konstant vattentryck. Utvärderingen omfattar en detaljerad tolkning av vattenförlusterna i hela hålet samt fördelningen av vattenförlusterna längs jämna intervall av borrhålet, /10-19/. Försöken avrapporteras under 1989.

10.2.3 "Sealing of Fractured Rock"

Material och teknik för att tätta sprickor i berg kring ett slutförvar studeras genom en omfattande forskningsinsats inom Fas 3.

Arbetet bedrivs med stöd av en Task Force i vilken ingår experter från Stripa-projektets medlemsländer. Denna Task Force ger inte bara synpunkter och stöd till de forskare som är primärt engagerade i forskningsarbetet utan bidrar även aktivt i arbetet och deltar i de olika forskningsprojekten.

Programmet är uppdelat i två delprogram:

- **Material för att tätta sprickigt berg.** En omfattande inventering har gjorts av alla de olika material som kan tänkas användas för injektering av sprickigt berg. Inventeringen visar på två material, cement och bentonit, vilka har egenskaper som gör dem för ändamålet lämpligare än andra material, /10—20/. Ett omfattande program pågår för att bestämma de utvalda materialens fysikaliska och kemiska egenskaper. Vidare har arbete startat för att definiera materialens långtidsstabilitet, /10—21/. Dessa laboratoriestudier kommer att pågå under hela den tid som omfattas av Fas 3 programmet.
- **Teknik för att tätta sprickigt berg.** Inom Stripa-projektets ram har teknik utvecklats för att injekte-

ra cement och bentonit i mycket fina sprickor med en sprickvidd ner till 50 μm , (0,05 mm). Tekniken innebär att ett dynamiskt injekteringstryck överlagras med ett statiskt tryck. Den har provats och visat sig fungera mycket väl både i laboratorieskala och i fältförsök, /10-21/. Fyra storskaliga fältförsök med injektering av sprickigt berg pågår för närvarande i Stripa gruva. Försöken skall visa hur berg kan tätas i ett antal praktiska situationer som uppkommer vid en slutförvarsplats, /10-22/. I Figur 10-3 och 10-4 illustreras försöken schematiskt.

Försök 1 omfattar tätning av berget kring två stycken deponeringshål. Avsikten är att undersöka hur effektivt och till vilket avstånd från deponeringshålen som berget kan tätas. Det injekterade berget värms upp till en temperatur av ca 90°C vid borrhålsperiferin och till en temperatur av ca 40°C på ca en meters avstånd från hålet. Försök 2 och 3 omfattar tätning av den så kallade störda zonen kring en deponeringstunnel. Försök 2:s syfte är att identifiera om det finns en zon kring en utsprängd tunnel vars hydrauliska egenskaper skiljer sig från bergmassan i övrigt, samt om så är fallet att ta reda på hur effektivt denna zon kan tätas med injektering. Försök 3 som bygger på försök 2 syftar till att identifiera om det finns en zon av berg med förändrade hydrauliska egenskaper på större avstånd än den närzon om ca 1,5 meter från tunnel periferin som tätas i försök 2, samt om så är fallet att klarlägga hur långt ut denna spänningsomlagrade störda zon sträcker sig.

Försök 4 omfattar tätning av en större sprickzon som skär en deponeringstunnel. Avsikten är att undersöka hur effektivt en sådan vattenförande naturlig zon kan tätas, samt att demonstrera att tätningen leder till att vattnet söker sig nya vägar bortom deponeringstunneln.

11 NATURLIGA ANALOGIER

11.1 ALLMÄNT

Omfattningen av undersökningar som avser naturliga analogier har ökat väsentligt de senaste åren. Det gäller såväl SKB som internationellt sett. Genom samarbete mellan olika nationella program och genom en nära knytning till säkerhetsanalysen och dess modellutveckling har utbytet av dessa undersökningar ökat väsentligt. Exempel på viktiga internationella initiativ är bildandet av National Analogue Working Group, NAWG, som arbetar under överinseende av EURATOM inom EG. Ytterligare exempel är en granskning av naturliga analogier och deras roll i säkerhetsanalysen som genomfördes 1987 av IAEA /11-1/. Naturliga analogier behandlas även inom det internationella INTRAVAL projektet. SKB medverkar aktivt inom samtliga dessa verksamheter.

NAWG har sammanträffat årligen sedan starten 1985. Bildandet var bl a ett resultat av det arbetsmöte om naturliga analogier som hölls i Lake Geneva, Wisconsin, USA, 1984. Mötet hade arrangerats av SKB i samarbete med US DOE. NAWG har tagit fram riktlinjer för att välja ut och använda naturliga analogier inom de olika nationella avfallsprogrammen. Vid utväljandet av en analogi är det av vikt, att de geokemiska processerna är tydliga och mätbara, att det finns naturliga kemiska element som är analogier till betydelsefulla radionuklider, att fysikalisk kemiska parametrar är mätbara och att tidskalan är känd och jämförbar med förvarets. Målen för en analog undersökning skall vara att:

- studera resultaten av de processer eller grupper av processer som är av betydelse för slutförvaringens långsiktiga säkerhet,
- finna begränsningar i de parametervärden som skall användas i säkerhetsanalysen,
- ge indikationer på vilka fenomen som kan vara av betydelse,
- studera det integrerade resultatet av förändringar och reaktioner i ett flerkomponentsystem efter mycket lång tid,
- vinna bredare förståelse och acceptans för slutförvaringens säkerhet.

Ett antal större analogiundersökningar pågår för närvarande på olika platser i världen. Till de mer prominenta hör undersökningarna i Poços de Caldas, Brasilien; i Cigar Lake, Kanada; i Alligator Rivers, Australien och i Oklo, Gabon. SKB är på olika sätt engagerade i dessa undersökningar. Poços de Caldas projektet leds av SKB. Vår medverkan i Cigar Lake projektet diskuteras för närvarande med AECL i Kanada. Resultat från Alligator Rivers projektet, ARAP, utvärderas av experter med stöd från SKB inom INTRAVAL projektet.

Berget och hydrogeologin där de större analogiun-

dersökningarna pågår kan vara relativt annorlunda jämfört med de tänkbara förvarsplatserna. Det uppvägs emellertid av att de fenomen och processer som man önskar studera är särskilt tydliga genom t ex höga naturliga halter av radionuklider och radionuklidliknande ämnen (som i Poços de Caldas, Oklo, Alligator Rivers och Cigar Lake), eller på extrema och unika förhållanden som redoxfronten i Poços de Caldas, lerbarriären i Cigar Lake och den naturliga reaktorn i Oklo. Det finns skäl att övergå till mera förvarslika geologiska och hydrogeologiska förhållanden i ett senare skede då erfarenhet och metoder har utvecklats inom ovan nämnda projekt. Vi räknar därför med framtida analogiundersökningar i direkt förvarsligt berg.

11.2 POÇOS DE CALDAS

Poços de Caldas-projektet avser studier av naturliga analogier till frigörelse och spridning av radionuklider från ett slutförvar. Undersökningarna är knutna till två närbelägna platser i Poços de Caldasområdet i Minas Gerais, Brasilien: toriumförekomsten i Morro do Ferro och urangruvan Osamu Utsumi, C-09.

Sverige (SKB), Storbritannien (UK DoE), Schweiz (NAGRA), USA (US DOE) och Brasilien (Rio de Janeiro Universitet, CNEN och NUCLEBRAS) deltar i projektet.

Projektet skall pågå i tre år, enligt ett avtal som gjorts upp mellan SKB, UK DoE, US DOE och NAGRA, vilka är de direkta finansörerna. Brasilien står för värdskapet och bidrar med arbetsinsatser och viss utrustning. SKB ansvarar för projektledningen.

Undersökningarna har delats upp i tre delprojekt:

- 1 Bestämning av speciering och kemisk transport av naturliga radionuklider och sällsynta jordartsmetaller i ett sprickflödessystem i kristallint berg under dels oxiderande, dels reducerande betingelser.
- 2 Bildning och rörlighet av kolloidburna radionuklider i naturliga grundvatten (här innefattas även huminämnen i kolloidbegreppet).
- 3 Termisk påverkan på transport av naturliga radionuklider och sällsynta jordartsmetaller.

De viktigaste målen för de två delprojekten är följande:

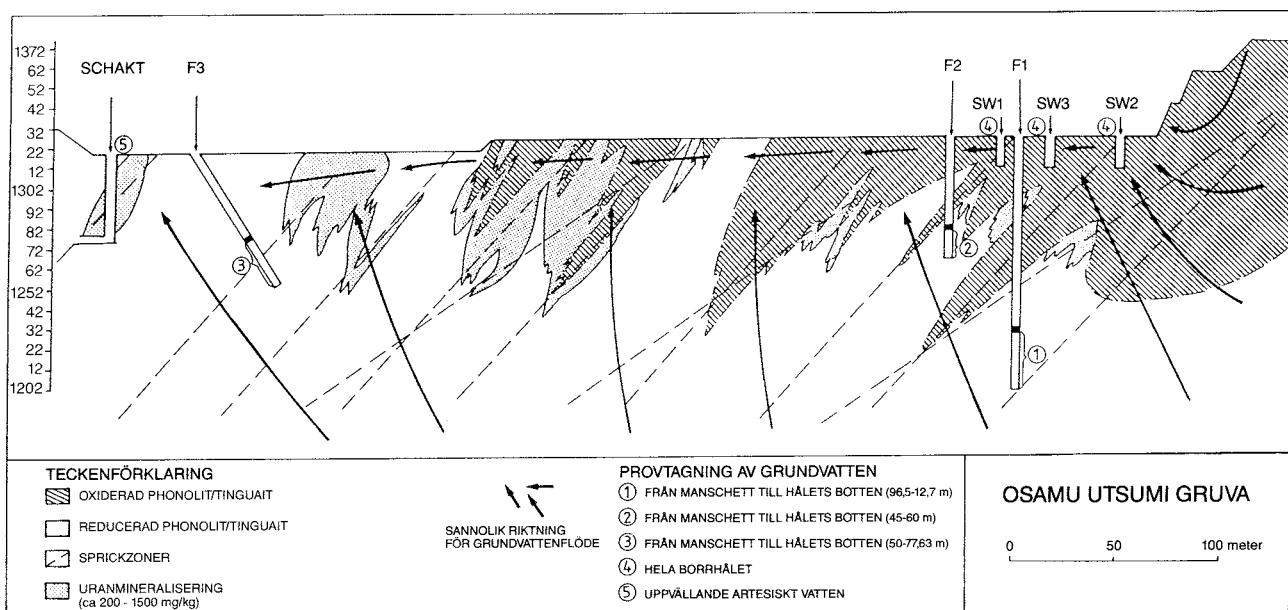
- 1 — Validera jämviktsmodeller för olika vatten/mineralsystem.
 - Förstå mekanismerna för upplösning och utfällning av uran och andra element kring redoxfronten.
 - Jämföra retentionsfaktorer från in situ mätningar med laboratorievärden.
 - Bestämma förekomst och omfattning av diffusion i bergets mikrosprickor.



Figur 11-1 Provtagning vid en redoxfront i urangruvan Osamu Utsumi för analys av mineralen.

Figur 11-2 Bergprover från en redoxfront. Utfällningar av uran i form av pechblände kan tydligt urskiljas som svarta fläckar.





Figur 11-3 Profil genom provtagningsområdet i dagbrottet i urangruvan Osamu Utsumi med några av borrhålen.

- Bestämma inflytandet av mikrober och mikrobiella processer på nuklidmigrationen.
- 2 — Karakterisera och haltbestämma naturliga kolloider och organiska komplex i grundvattnet.
 - Bestämma andelen torium, radium och sällsyna jordartsmetaller som transporteras i form av kolloider och organisk komplex.
- 3 — Mäta och utvärdera fördelningen av analoga element över en hydrotermal kontaktzon i berget.
 - Bestämma den lokala utbredningen av hydrotermal aktivitet.
 - Bestämma de hydrotermala lösningarnas sammansättning och deras påverkan på bergets permeabilitet.
 - Förstå mekanismen för hydrotermalt påverkad radionuklidtransport.

Projektet startade med en inledande fas i maj 1986. Sedan dess har fem kärnborrhål borrats i urangruvan, det djupaste ned till ca 300 m, och fyra kärnborrhål i Morro do Ferro, varav det djupaste ned till ca 80 m. Mikrobiell provtagning och geologisk loggning av kärnorna görs parallellt med borrhningen. Därpå följer provtagning av kärnorna för geokemisk mineralogi. Geofysisk loggning och hydraultestning av borrhålen genomförs. Borrhålen används vidare för en omfattande provtagning av grundvattnet och övervakning av eventuella förändringar i grundvattnets sammansättning under ca ett år.

Fältarbetena avslutades sommaren 1989. Projektet är nu i en fas då analyser kompletteras, resultat utvärderas och modellberäkningar genomförs. Modellberäkningar utförs även av forskare och grupper med stöd utanför projektet. Ett viktigt initiativ har därför tagits att koordinera dessa valideringsinsatser. Den koordinerade modellbehandlingen koncentreras till följande delmål: att öka förståelsen av de beskrivande modeller som används för säkerhetsanalysen, att validera beräkningsmodeller som används i säkerhetsanalysen och att förbättra databasen i sådana modeller.

11.3 CIGAR LAKE

Diskussioner pågår om ett samarbete med AECL i Cigar Lake projektet i Kanada.

Uranmineraliseringen utgör en av flera liknande i området /11-2/. Den är belägen helt under jord på ett djup om ca 430 m, i kontakt med sandsten och underliggande urberg. Malmkroppen är 2 km lång, 25—100 m bred och 1—20 m djup. Den är omgiven av en 5—30 m tjock lerrik halo som till största delen utgörs av illit, kaolinit och kvarts. Malmen och omgivande lerzon har bildats hydrotermalt för ca 1,3 miljarder år sedan då reducerande hydrotermala lösningar från urberget strömmade ut i sandstenen. Cigar Lake har kan i flera avseenden sägas vara en nära fullständig analogi. Det illustreras av tabell 11-1 (efter /11-2/) som jämför Cigar Lake med det kanadensiska slutförvarskonceptet vilket till vissa delar liknar KBS-3.

Tabell 11-1 Jämförelse av Cigar Lake med det kanadensiska slutförvarskonceptet.

Egenskap	Slutförvar	Cigar Lake
Utformning	Använt bränsle isolerat med bl a en lerbuffert (bentonit och sand) på ett djup av 1000 m i kristallint berg	Uranmalm isolerad av lerrick halo på ett djup större än 400 m.
Avfallsform	Utbränt bränsle (UO ₂). Mer än 80 viktsprocent uran	Uraninit (UO ₂), 12—55 viktsprocent uran.
Buffer	Blandning av sand och bentonit Sorption av flera kemiska element förutsättes	Lerrick halo, huvudsakligen av illit och kvarts. Leran har hållit kvar elementen Cu, U och Zn.
Kolloider	Kolloider av betydelse för radionuklidmigration	Kolloider som bildats i malmzoner har fångats in i lerhalon.
Tidsskalan	Ett skydd för minst 10 000 år föreskrivs (Kanada)	Uranit har funnits kvar i mer än 1 miljard år i vattenmättat berg.
Termisk påverkan	En förhöjd temperatur på mindre än 100 °C har beräknats för mer än 20 000 år	Uranmineraliseringen bildades ur hydrotermala lösningar vid 150—200 °C i mer än 50 millioner år.
Omgivningspåverkan	Dosgränser föreskrivs	Inga indikationer (t ex radiologiska, termiska, direkt geofysiska eller geokemiska finns på markytan som visar att malmen existerar.

12 BIOSFÄRSSTUDIER

12.1 BIOSFÄRSSTUDIERNAS BETYDELSE FÖR SLUTFÖRVARING AV KÄRN-AVFALL

Som framgår av tidigare kapitel syftar slutförvaringen till att isolera det radioaktiva avfallet från biosfären under så lång tid att radioaktiviteten avklingar till en ofarlig nivå. För att kunna bedöma konsekvenserna av onormal barriärfunktion och visa att de radiologiska konsekvenserna är obetydliga behöver man kunskap om hur radioaktiva ämnen sprids i biosfären. Till biosfären räknas den del av vår värld dit människan normalt har tillträde. I studierna av biosfären ingår följande processer och beräkningssteg signifikanta för säkerhetsanalysen.

- Transport från grundvatten i berg till ett lokalt ekologiskt system via olika lokala mottagare såsom sediment, jord, vatten mm.
- Transport, utspädning, ackumulering och deponering i lokala, regionala och globala ekologiska system.
- Beräkning av individdoser och kollektivdoser samt jämförelse med naturliga förhållanden.

12.2 MÅL

Målet för SKBs studier av biosfärens egenskaper och av radioaktiva ämnens uppträdande i biosfären är att kunna genomföra säkerhetsanalysens konsekvensberäkningar på ett trovärdigt sätt. Insatserna kommer att koncentreras på att kunna göra en uppskattning av vilka konsekvenser olika utsläppsscenarier från ett slutförvar har i ett tidsperspektiv av storleksordningen 10 000 år. Delmål i denna process är att:

- söka kvantifiera de osäkerheter som beror på att biosfären hela tiden förändras,
- förbättra det dataunderlag som spridningsmodellerna vilar på,
- validera modellerna bl a genom studier av analoga spridningsprocesser.

12.3 NUVARANDE KUNSKAPSLÄGE

12.3.1 Biosfärens evolution

Eventuella aktivitetens utsläpp från ett slutförvar kommer troligen att ske så långt fram i tiden och under så lång tidsrymd att betydande förändringar i biosfärens egenskaper förväntas inträffa före och/eller under ut-

släppsförloppet. Detta innebär att analyser av konsekvenserna av ett utsläpp kommer att ha stora osäkerheter.

Den största osäkerhetsfaktorn hänger ihop med ekosystemens naturliga evolution under de tidsperioder som kan anses realistiska. Exempel på processer i ett kortare tidsperspektiv är:

- igenväxning av sjöar och uppodling av de gamla sedimenten (även pga landhöjning),
- erosion av jordar med vind och vatten,
- omlagring av sediment i sjöar och vattendrag,
- stadsbyggnation, stora asfaltytor, tunnlar mm.

I något längre perspektiv måste även klimatförändringar och glaciation tas med i bilden. Biosfären genomgår då en mycket radikal förändring och kan återuppstå på ett stort antal sätt. Frågan är dock hur meningsfullt det är att göra dosuppskattningar i det skedet.

Människan utnyttjar de ekologiska systemen bl a för sitt näringsfång och förändrar dessa för att öka utbytet. Detta kan också sägas utgöra en slags evolution. Dagens situation uppvisar ett stort antal exempel på detta /12-7/. Denna påverkan kan ha stor betydelse för konsekvensen av ett eventuellt utsläpp, speciellt om sådana företeelser som stadsbyggnation, storskalig jordfri odling, dammbyggnader eller växthuseffekten tas med i bilden /12-13/. En inventering av rimliga sådana företeelser har diskuterats i samband med SKB/SKIs gemensamma scenariodefinitionsarbete.

SKBs insatser har under de senaste åren varit koncentrerade till sjöars åldrande dvs processen där sjöars botten sediment gradvis omvandlas till åkerjord. En insamling och bearbetning av data för Trobbofjärden i Södermanland har gjorts /12-1,2,3/ omfattande vattenflöde, sedimentationshastighet, porvattenegenskaper, vattenkvalitet under olika skeden mm. Modellering /12-4/ och variationsanalys visade att individdoserna för vissa nuklider ökade med flera tiopotenser då sjöns sediment används som åkermark. För andra nuklider minskade doserna med någon tiopotens. Den största källan till osäkerhet är omsättningen i sjöns vatten och sediment. Detta scenario ger dock lägre doser än då en brunn antas borrar till depositionsområdet. Detta projekt beräknas kunna avslutas 1990.

12.3.2 Transportvägar mellan berg och människa

Grundvattnet och däri lösta ämnen kommer på sin väg till ytan att lämna den reducerande miljön i berget och passera in i en oxiderande miljö. Denna övergång är för de flesta aktuella kemiska föreningar förknippad med en drastisk förändring av löslighet. Övergången sker

ofta i sediment eller jord men kan också ske direkt i fritt vatten. I de box-modeller som tidigare använts har dessa processer approximerats med ett antal överföringskoefficienter. En del studier /12-10,11/ visar dock att större hänsyn kanske bör tas till detta gränsskikt.

En detaljundersökning av utströmning i sjöar "Nuklidtransport i utströmningsområden" initierades under 1987. I denna gjordes bl a provtagning i Hille-sjön och Långhalsen i Södermanland för att undersöka hur bottensedimentens kemi och fauna i utströmningsområden skiljer sig från bottensedimenten i övrigt.

12.3.3 Övrig forskning inom biosfärsområdet

Forskning rörande radionuklidens spridning i biosfären, och med viss relevans för slutförvaring i geologiska formationer, bedrivs av ett fåtal institutioner vid Sveriges Lantbruksuniversitet, Göteborgs Universitet, FOA4 samt i någon mån av Studsvik och Kemakta på uppdrag av SSI och SKI. I Norden kan även Risö i Danmark och VTT i Finland nämnas. Annan forskning om kemiska ämnen i miljön kan i vissa fall vara relevant.

12.4 FORSKNINGSPROGRAM 1990-1995

12.4.1 Biosfärens förändringar

I anslutning till arbetet på systematisk analys av scenarier kommer bl a inverkan av klimatförändringar och istider samt mänsklig påverkan att studeras. Se vidare i kapitel 3 och 6.

Projektet om sjöars åldrande avslutas under perioden.

12.4.2 Transportvägar i biosfären

Studier av "Nuklidtransport i utströmningsområden" fullföljs med en undersökning av vissa nuklidens rörlighet i sedimenten (bl a U, Tc, Cs). Sedimentens roll som långsiktig och eventuellt slutlig sänka för utsläppta radionuklider bör studeras mer ingående.

Med anledning av Tjernobylyolyckan initierades 1986 en kartläggning av nedfallet i SKBs undersökningsområden Gideå och Finnsjön /12-8/. Dessa avses fortsätta ytterligare fem år. Projektet omfattar provtagnings- och mätprogram, studier av migration i markprofiler, sorption på och migration i berg, vattentransporterad aktivitet samt modellering av nuklidernas omsättning och transport. /12-5, 6/.

Målet för provtagnings- och mätprogrammet är att kunna utnyttja migrationen av nukliderna i nedfallet för verifiering och validering av modeller som beskri-

ver omsättning i biosfär och geosfär. För markmigrationsstudierna är målet att beskriva transport- och retardationsmekanismer för olika nuklider i olika jordarter så att modeller för denna transport kan förbättras.

Bindning av aktinider och jod på organiskt material i jordar kan vara en väsentlig faktor för expositionsvägen via grönsaker, kött och mjölk. Betydelsen av osäkerheten i transuranernas omsättning kommer att utvärderas. Eventuellt kan experimentella studier behöva genomföras.

12.4.3 Modeller och data

Spridningsberäkningar i KBS-3 genomfördes med traditionell box-modellering baserad på tillgängliga data om dagens ekologiska system. Dosberäkning sker med liknande modeller utnyttjande radiofysiska data och sammanfattade i bl a internationellt accepterade rekommendationer utfärdade av ICRP.

Validering av modeller kommer fortlöpande att ske bl a internationellt inom IAEA/CEC-projektet Validation of Model Predictions, VAMP, eller en eventuell fortsättning på BIOMOVIS /12-12/ och med hjälp av data från Tjernobylnedfallet i Gideå och Finnsjön. Vissa av de parametrar som används i box-modellerna är dåligt undersökta för nordiska förhållanden. Känslighetsanalyser kommer att i hög grad få avgöra vilka parametrar som kommer att studeras vidare under den kommande sexårsperioden.

12.4.4 Platsspecifika studier

För sådana fall där utsläppen inte börjar förrän efter många 10 000-tals år, då istider troligen dragit fram, kan placeringen av förvaret inte påverka spridningen av eventuella utsläpp i biosfären.

I scenarier där utsläpp sker i en närmare framtid kommer dock förvarets placering att kunna spela en viss roll för hur radionukliderna kan transporteras från berget till de lokala ekosystemen och vilka egenskaper utflödespunkterna har.

Vid scenarier där utsläpp antas ske inom några tusental år, t ex vid en initial kapselskada blir platsen viktig för spridningen i lokala ekosystem, eftersom nuvarande förutsättningar för markanvändning, i stor sett, kan väntas kvarstå under denna tid.

Det är därför av intresse att genomföra en platsspecifik modellstudie, vilken även bör ta hänsyn till slutförvarets lokala påverkan. En lämplig plats för en sådan studie är bergslabsområdet. Detta bör då karakteriseras med avseende på förekomst av naturlig radioaktivitet i ytliga vatten, grundvattenförhållanden, utströmningsområden, jordarter, markanvändning, biota, befolkning mm så att mindre generaliserade modeller kan användas /12-9/.

Motsvarande undersökningar planeras även ske på de kandidatplatser som föreslås för lokalisering av slutförvaret.

12.4.5 Acceptanskriterier

Val av radiologiska acceptanskriterier har stor betydelse för hur biosfärsanalyser skall göras. Internationella organs arbete bör noga följas (ICRP 46). De svenska myndigheterna kommer troligen att ange minimikrav. I sammanhanget kan jämförelser mellan modellberäkningar och observationer av utflöden av naturliga nuklider i människans omgivning t.ex. uranrik markproduktion, vara av intresse.

Svenska säkerhetsanalyser har liksom i andra länder utgått från principen att "om människan som individ och grupp är skyddad så kommer andra biologiska arter ej att hotas av radioaktiva utsläpp". Denna princip har tillämpats på alla typer av utsläpp icke endast från avfallslager eller slutförvar. Principen har på senare tid ifrågasatts av några forskare och bör i görlig mån kontrolleras. Detta är främst en uppgift för de myndigheter som anger acceptanskriterier. SKB avser att följa utvecklingen.

13 INTERNATIONELLT SAMARBETE

Utvecklingen inom kärnavfallsområdet sker i stor utsträckning i internationell samverkan och växelverkan. De flesta länder med ett större kärnkraftprogram har gjort upp planer för hantering av olika former av radioaktivt avfall och har påbörjat den forskning och utveckling som anses krävas. I ett internationellt perspektiv pågår därför idag en mycket omfattande verksamhet i form av experiment, modellutveckling, platsundersökningar, datasammanställningar etc inom kärnavfallsområdet, varav de svenska insatserna naturligtvis endast utgör en liten del. I vilken utsträckning man för svensk del kan få direkt nytta av det som görs i andra länder beror i första hand på följande två faktorer:

- tekniska och geologiska likheter i förvarsutformning och plats,
- tidplaner för genomförande av forskningsprogram, storskaleförsök och demonstrationsprojekt samt byggande/drift av slutförvar.

Den nytta man för svensk del kan ha av andra länders forskning kan ligga på flera olika plan:

- bidrag till metod och modellutveckling,
- vidgat och förstärkt dataunderlag,
- belysning av andra alternativ för förvars- och barriärutformning, materialval etc,
- bidrag till att förstärka den allmänna tilltron till systemet genom bl a demonstrations- och storskaleförsök.

En viktig del av SKBs program är därför att på ett genomtänkt och effektivt sätt följa och ta tillvara den forskning och utveckling som sker i andra länder. Detta underlättas av det stora intresse som föreligger internationellt för det svenska arbete. I det följande ges en sammanfattning av ett urval av de utländska programmen. Vidare ges en översikt över de olika internationella samarbetsprojekt i vilka SKB är direkt engagerat.

13.1 UTLÄNDSK FoU AV VIKT FÖR SKBs PROGRAM

USA

Tidplanerna i USA styrs i hög grad av "Nuclear Waste Policy Act" vilken antogs 1982. Lagen har genomgått genomgripande förändringar varav den senaste 1987. Lagen fastslår att den federala regeringen har ansvaret för slutförvaring av högaktivt avfall och använt bränsle. Det åligger US DOE, Department of Energy, att bygga ett slutförvar vilket enligt lagen måste kunna börja användas senast 31 januari 1998. Det amerikanska platsvalet har genom den senaste lagändringen i princip redan genomförts och resurserna är nu inriktade på Yucca Mountain i Nevada. Förvaret planeras här

på 400 m djup i vattenomättat berg vilket ger ca 200 m omättad tuff som den huvudsakliga geologiska barriären ovanför den nuvarande grundvattenytan. Grundvattentransporten sker extremt långsamt, enligt beräkningar ca 0,1 mm/år. Metodiken för karakterisering av Yucca Mountain, modellutveckling, studier av avfallsformer och säkerhetsanalysen är bl a områden där erfarenhetsutbyte är av värde för Sverige även om förvarsmediet är annorlunda. Direktkontakter har etablerats med ett antal specialister som leder olika projekt i det amerikanska avfallsprogrammet. En person från SKB är nu stationerad vid US DOEs kontor i Nevada.

Kanada

AECL (Atomic Energy of Canada Ltd) är den federala organisationen som har ansvaret för Kanadas kärnkraftsprogram. AECL svarar också för forskning och utveckling rörande förbehandling och slutförvaring av kärnbränsleavfall. Det delstatsägda kraftföretaget Ontario Hydro ansvarar för mellanlagring och transport av använt kärnbränsle. Ansvarsfördelningen mellan den federala regeringen och delstatsregeringarna, då det gäller slutförvaret, är ännu inte fastlagd. Kanadas program för slutförvaring omfattar tre faser:

- utvärdering av metoder för slutförvaring (concept assessment),
- platsval (site selection),
- demonstration av slutförvar (demonstration of disposal vault).

Den första fasen pågår nu. I ett 10-årsprogram genomför man forskning för att etablera en vetenskaplig bas för geologisk slutförvaring och för tekniska kriterier för platsval och förvarsutformning. Under hösten 1989 skall ett förslag till slutförvarsmetod presenteras för myndighetsgranskning. En omfattande granskning förutses, med bl a "public hearings", vilken 1990-91 ger en slutbedömning av den granskade metoden. Platsundersökningar och platsval beräknas ske under 1990-talet. När en plats valts ut, avser man att genomföra en 20-årig demonstrationsperiod, som avslutas med att demonstrationsanläggningen byggs ut till ett slutförvar, som alltså kommer att tas i drift efter år 2010.

Berggrunden i Kanada påminner mycket om den skandinaviska, varför mycket av de geologiska undersökningarna i Kanada är av intresse för det svenska programmet. Av speciellt intresse är det sk URL (Underground Research Laboratory)-projektet där man går ned med ett schakt till ca 450 m djup i berggrunden. SKB har en överenskommelse med AECL om deltagande i URL, se avsnitt 13.4. Kanada ligger också långt framme inom kemiområdet och när det gäller studier av använt bränsle.

Finland

Ansvar för kärnavfallshanteringen i Finland åvilar enligt finsk lag kärnkraftproducenterna. De två kraftbolagen IVO och TVO har bildat ett gemensamt bolag, YJT, som skall samordna erforderlig forsknings- och utvecklingsverksamhet.

För använt kärnbränsle eftersträvar man sådana överenskommelser att det använda bränslet kan sändas utomlands för sluthantering. För Loviisareaktorerna har man ett sådant avtal med Sovjetunionen. Övrigt kärnbränsle skall mellanlagras och slutförvaras i Finland. För mellanlagring har en anläggning byggts i Olkiluoto. Plats för ett slutförvar kommer att väljas omkring år 2000 och slutförvaring beräknas starta omkring år 2020.

I början av 1986 presenterades en lista på 101 intressanta områden för ett slutförvar vilka utvalts vid en inventering. Under perioden 1988-1992 genomförs orienterande undersökningar på 5—10 av dessa områden. Dessa följs av detaljerade undersökningar på 2—3 områden fram till år 2000, då den slutliga platsen väljs. På denna görs ytterligare undersökningar fram till en ansökan om tillstånd omkring år 2010.

Likheter mellan den svenska och finska berggrunden innebär att informationsutbytet är särskilt värdefullt.

För låg- och medelaktivt avfall bygger TVO för närvarande ett slutförvar vid Olkiluoto. Förvaret byggs på 70—100 m djup och beräknas kunna tas i drift 1992. IVO kommer att under slutet av 1990-talet bygga ett liknande förvar i Loviisa.

Frankrike

Ansvar för att genomföra slutförvaring av kärnavfall i Frankrike ligger hos ett fristående organ — ANDRA — inom atomenergikommissariatet, CEA. Forsknings- och utvecklingsarbeten genomförs främst av CEA. För högaktivt avfall har platsvalsfrågan föregåtts av en rekognoscering av flera hundra platser där såväl granit, salt, lerskiffer och havssediment har undersökts. Platsvalet är i mycket en politisk fråga och rekommendationer till kriterier har gjorts 1987 i den sk Gougelrapporten.

Fram till 1990 kommer platsundersökningarna att fortsätta. En plats för att bygga ett underjordslaboratorium kommer sedan att väljas där noggrannare mätningar kan komplettera de tidigare undersökningarna. Mot mitten av 1990-talet räknar de franska myndigheterna med att ha underlag framme för ett slutligt systemval för förvaring av högaktivt avfall.

Låg- och medelaktivt avfall har förvarats sedan 1969 vid La Manche. Detta förvar kommer att vara fyllt i början av 1990-talet. En ny förvarsplats byggs därför vid Aube ca 20 mil söder om Paris. Detta förvar kommer att kunna ta emot avfall med början 1991. Aube-förvaret kommer att kunna ta emot 100 000 m³ kortlivat avfall, vilket motsvarar ca 30 års kärnkraftproduktion. SKB har ett konkret samarbete med CEA bl a inom områdena radionuklidkemi och buffert/återfyllnad.

Västtyskland

I Västtyskland avser man att slutförvara högaktivt avfall i en saltformation i Gorleben. Ingen annan plats är för närvarande aktuell. I Gorleben genomförs ett omfattande undersökningsprogram, inkluderande schakt drivning ned till förvarsdjup, som beräknas bli klart i början av 1990-talet. Man skulle då kunna ta i drift en slutförvarsanläggning i slutet av 1990-talet.

De geologiska studierna i salt är av litet intresse för svensk del. Västtyskland är emellertid det land, jämte Sverige, som mest systematiskt har undersökt direktdeponeringsalternativet. Dessa studier redovisades våren 1985 i en omfattande studie, PAE, Project Andere Entsorgungstechniken. PAE-projektet drivs vidare, bl a med inriktning på demonstration i fullstor skala av vissa moment, t ex kapseltillverkning och hantering av inkapslat bränsle. Huvuddelen av det använda kärnbränslet från det västtyska programmet kommer att upparbetas. Direktdeponering kan bli aktuell för vissa udda bränsletyper. SKB följer det fortsatta arbetet på direktdeponering i Västtyskland genom informationsutbyte med PAE-projektet.

Låg- och medelaktivt avfall kommer att slutförvaras i en tidigare järnmalmgruva, Konrad. Licensieringsarbetet för detta slutförvar beräknas kunna starta under hösten 1989. Drifftagningsstidpunkten är för närvarande ej fastlagd och beror bl a på resultaten från de offentliga utfrågningar som kommer att hållas under 1990.

Schweiz

Enligt atomenergilagen i Schweiz skall kärnkraftföretagen lägga fram en plan för säker slutförvaring av radioaktivt avfall. Den schweiziska staten och kärnkraftföretagen har gemensamt bildat NAGRA (Nationale Genossenschaft für die Lagerung Radioaktiver Abfälle) för att ta hand om det radioaktiva avfallet.

NAGRA publicerade 1985 sin studie Projekt Gewähr, en motsvarighet till KBS-3-rapporten. Deponeringen av högaktivt avfall rekommenderades i rapporten ske på stort djup i kristallint berg. En försöksstation i berg, motsvarande den svenska Stripa-gruvan, har byggts i Grimsel i Alperna.

I juni 1988 godkände den schweiziska regeringen Projekt Gewähr. Man begärde dock att få kompletterande underlag till 1990 angående ett koncept för lagring av avfall i sediment samt att en utvärderingsrapport angående samtliga undersökningar i kristallint berg tas fram till årsskiftet 1990/91. Platsval i Schweiz kommer att äga rum omkring år 2000 och ett slutförvar avses tas i drift ca år 2020.

För förvar av låg- och medelaktivt avfall har NAGRA under första delen av 1980-talet gjort undersökningar på tre platser. På grund av lokalt motstånd och politiska låsningar har dessa platser ej kunnat komma i fråga. I juni 1987 inlämnades en ansökan att få undersöka en ny plats, Wellenberg. NAGRA erhöll från centrala myndigheter i augusti 1988 klartecken för tunneldrivning fram till 100 m från avsedd förvaringsplats. Erforderliga tillstånd från lokala myndigheter saknades fortfarande i maj 1989.

SKB har nära kontakter med NAGRA och det

schweiziska programmet. Inom områdena kapselmateri- al och naturliga analogier sker direkt samarbete och koordinering av insatserna.

Storbritannien

Under 1970-talet initierades i Storbritannien ett program för geologiska undersökningar för slutförvar i granitformationer. I december 1981 uppskötts fortsatt verksamhet inom detta program för åtminstone 50 år framåt, med motiveringen att man visat att slutförvaring i princip var möjlig samt att man utan problem säkert kan mellanlagra högaktivt avfall under en sådan tidsperiod. Således väntar inga ytterligare beslut om slutförvaring av HLW inom de närmaste decennierna. FoU i Storbritannien ägnas därför nu enbart teknik för förglasning av högaktivt avfall samt lagring och modellstudier. Dessutom deltar man aktivt i bl a Stripa-projektet, Poços de Caldas-projektet och NEAs sea-bed disposal-studier.

För låg- och medelaktivt avfall omfattar planeringen ett SFR-liknande förvar som avses byggas under havet. Eventuellt kommer förvaret att placeras på ca 1 000 m djup. I mars 1989 beslutades att förberedande undersökningar skall genomföras på två platser, Sellafield och Dounreay. Undersökningarna väntas vara genomförda till 1992. Efter att den slutliga platsen valts följer några år av offentliga utfrågningar och remisser. Slutförvaret beräknas kunna tas i drift ca år 2005.

EG

EG driver ett omfattande och väl samordnat program inom kärnavfallsområdet. Arbetet genomförs i sk 5-årsprogram och den senaste programperioden sträcker sig från 1985-1989. I planen för nästa programperiod, 1990-1995, ingår följande punkter.

1. Systemstudier och harmonisering av medlemsländernas avfallshantering och "policies".
2. Behandling av radioaktivt avfall.
3. Karakterisering av avfallsformer, kapslingsmetoder och kapselmateriäl.
4. Forskning inom området "utveckling av underjordiska förvarsanläggningar".
5. Säkerhetsanalyser.

Arbetet har hittills utförts i fält vid underjordiska anläggningar i Asse i Västtyskland, Mol i Belgien samt vid den franska försöksanläggningen i Fanay-Augères.

I nästa programperiod räknar man även med att kunna utföra arbete vid en ny fransk, underjordisk försöksanläggning. Platsvalet för denna är planerad till 1991 med drifttagning 1994. En liknande anläggning planeras även i Storbritannien och platsen för anläggningen planeras här väljas omkring 1993.

Sverige deltar genom SKB i flera av EGs projekt t ex COCO-klubben (Colloids and Complexes), CHEMVAL och NAWG (Natural Analogue Working Group), se avsnitt 13.10.

Sovjet

Under 1988 slöts ett samarbetsavtal med SCUAE (State Committee on the Utilization of Atomic Energy), Sovjetunionen, angående avfallsfrågor. Ett första

seminarium med sovjetiska forskare hölls under våren 1989. Det sovjetiska programmet tycks inriktat på förvaring av upparbetat avfall i saltformationer. Inga konkreta samarbetsprojekt finns för närvarande.

Japan

Ansvar för hantering av radioaktivt avfall är i Japan uppdelat på två myndigheter; Science and Technology Agency, STA, vilket är en del av regeringskansliet, samt Ministry of International Trade and Industry, MITI. STA är inriktat på forskning och utveckling inom teknik och vetenskap medan MITI är verksam inom den industriella delen av avfallshanteringen.

Under STA arbetar bolagen Power Reactor and Nuclear Fuel Development Co., PNC och Japan Atomic Energy Research Institute, JAERI. PNC har till uppgift att fram till 1992 presentera ett förvarskoncept för högaktivt radioaktivt avfall och att genomföra en säkerhetsanalys för detta, medan JAERI arbetar med geokemiska frågor samt relaterat säkerhetsarbete.

Under MITI finns Central Research Institute of the Electric Power Industry, CRIEPI, som på uppdrag av kraftbolagen arbetar med säkerhetsanalys, instrumentutveckling och kostnadsberäkningar.

För det låg- och medelaktiva avfallet har bolaget Japan Nuclear Fuel Industries Company, Inc., JNFI ett övergripande ansvar. Man planerar för närvarande ett förvar i Rokkashomura i norra delen av landet. Förvaret planeras tas i drift 1992.

I juli 1989 tecknade SKB ett samarbetsavtal med JNFI angående informationsutbyte inom området avfallshantering av låg- och medelaktivt avfall.

Internationella organisationer

Övergripande internationellt samarbete sker inom FNs atomenergiorgan IAEA och inom OECDs kärnenergiorgan, NEA. Dessa organisationer är naturliga fora för informationsutbyte inom området radioaktivt avfall, se avsnitt 13.11.

13.2 SKBs SAMARBETSAVTAL MED UTLÄNDSKA ORGANISATIONER

SKB strävar efter att på ett systematiskt sätt tillgodogöra sig relevanta resultat från det utvecklingsarbete som sker i andra länder. I detta syfte har SKB tecknat formella bilaterala avtal med följande organisationer i andra länder:

- USA — US DOE (Department of Energy),
- Kanada — AECL (Atomic Energy of Canada Ltd),
- Schweiz — NAGRA (Nationale Genossenschaft für die Lagerung Radioaktiver Abfälle),
- Frankrike — CEA (Commissariat a l'Energie Atomique),
- EG — EURATOM,
- Finland — TVO och IVO,
- Sovjet — SCUAE (State Committee on the Utilization of Atomic Energy),
- Japan — JNFI (Japan Nuclear Fuel Industries Company, Inc.).

Informationsutbyte utan formella avtal finns dessutom med:

- Västtyskland,
- Belgien,
- Storbritannien,
- övriga nordiska länder.

De formella avtalen 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. Anordnade av gemensamma seminarier och korta besök av specialister till andra partens anläggningar är andra exempel på vad som ryms inom avtalens ram. Med ca ett års intervall sker allmänna genomgångar av parternas avfallsprogram och verksamhetsplanering.

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.

13.3 JSS-PROJEKTET — RESULTAT

JSS-projektet, som startade 1982 avslutades vid utgången av 1987. Projektet var ett samarbete mellan CRIEPI (Japan), NAGRA (Schweiz) och SKB för studier av radioaktivt glas. I faserna I till III var målen för projektet att:

- undersöka om radioaktiva glas i något avseende visar ett annat beteende vid kontakt med vatten, än ett kemiskt identiskt icke-radioaktivt glas,
- bygga upp en oberoende databas för det glas, som var tänkt att levereras av Cogéma inom ramen för ingångna uppdragsavtal.

Resultaten visade att både det radioaktiva och det icke-radioaktiva glaset hade i allt väsentligt samma beteende vid kontakt med vatten. Dessutom hade de data som erhöles så hög kvalitet att de bedömdes kunna tjäna som underlag för att utveckla en prediktiv modell för glaslakning under förvaringsförhållande. Projektet utvidgades därför successivt med faserna IV och V, som pågick från 1984 till slutet av 1987. I dessa faser ingick förutom modellutveckling också kompletterade experimentella studier /13-1, 2, 3/ och studier av naturliga analogier /13-4/.

Resultaten från fas V visar att ett glasblock av Cogématyp vid 90 °C inte skulle vara helt omvandlat inom 10 000 år. Om temperaturen sänks kan glasets beständighet öka avsevärt. Vid 50 °C närmar sig tidsperioden för fullständig omvandling av glaset en miljon år. Spridningen av fissionsprodukter och aktinider från glaset beror emellertid inte enbart på den hastighet med vilken glaset omvandlas, utan också på lösligheter hos sekundära faser som kan bildas och inkorporera dessa ämnen.

13.4 SAMARBETE MED AECL RÖRANDE UNDER- GROUND RESEARCH LABORATORY

Våren 1987 slöts ett treårigt avtal om samarbete rörande karakterisering av berget på 240 m nivån i AECLs underjordiska berglaboratorium URL i Manitoba, Canada.

Utbytet har varit till ömsesidig nytta för AECL och SKB. För att maximera informationsutbytet har SKB haft specialister vid URL i olika perioder för att genomföra gemensamma projekt. Hittills har uppföljningen varit inriktad på geologi, bergmekanik och geohydrologi, se vidare avsnitt 6.2.2.1. Under det närmaste året kommer samarbete rörande grundvattenkemi att påbörjas.

13.5 BRÄNSLELAKNING — WORKSHOPS

Studier av korrosion av högaktivt bränsle bedrivs endast av ett fåtal laboratorier i världen. Det experimentella arbetet är både kostsamt och tidsödande, eftersom det måste utföras i "hot cell". Det är därför viktigt att det finns ett möjligheter att på ett informellt sätt utbyta resultat och erfarenheter. De "Spent Fuel Workshops", som startades 1981 på SKBs initiativ har sedan dess fungerat som ett sådant forum.

Sedan starten har sammanlagt åtta "workshops" hållits. Från att ursprungligen endast ha haft deltagare från Sverige, Canada och USA, har gruppen vidgats. Deltagare har inbjudits även från länder, som har intresse för direktdeponering av använt kärnbränsle, men som ännu inte bedriver några experimentella undersökningar på högaktivt material.

13.6 HYDROCOIN

Detta projekt avser en internationell jämförelse och verifiering av olika beräkningsprogram för grundvattenströmning. Projektets tredje och sista nivå planeras bli avslutad under 1989. SKI leder projektet som pågått sedan 1981.

Nivå 1 av projektet som slutrapporterats syftade till att verifiera den numeriska noggrannheten i de olika datorprogrammen. SKB har genomfört beräkningar på tre av de sju testfallen med programmet GWHRT /13-5/.

I nivå 2 som omfattar validering av modeller mot fältmätningar eller laboratorieförsök har SKB deltagit i ett av testfallen /13-6/. GWHRT har använts även här.

Inom nivå 3 ska känslighets- och osäkerhetsanalyser utföras på sju olika testfall. SKBs medverkan har slutrapporterats /13-7/.

13.7 INTRAVAL

INTRAVAL är ett internationellt projekt som syftar till att validera beräkningsmodeller för radionuklidtransport i geosfären. Projektet är en uppföljning av de tidigare projekten HYDROCOIN och INTRACOIN. Samtliga dessa har tillkommit på SKIs initiativ och de har även tillsatt det sekretariat som samordnar arbetet inom INTRAVAL.

Sammanlagt fjorton testfall ingår i projektet. Det är resultat från utvalda laborieförsök, fältförsök och studier av naturliga analogier som utvärderas. I många av fallen är det möjligt för olika modellgrupper att göra prediktiv modellering innan mätresultaten blivit tillgängliga.

Fem av de fjorton testfallen är SKB-anknutna:

- laborieförsök med migration i överborrade sprickor/KTH,
- spår-försöken i Finnsjön inom sprickzonsprojektet/SGAB,
- Stripa 3D-migration/KTH,
- Poços de Caldas-projektet,
- kolloidtransport/BGS,
- redoxfront/KTH.

INTRAVAL planeras att pågå till i slutet av 1990 med en möjlighet till förlängning i ytterligare tre år.

13.8 SAMARBETE MED TVO, FINLAND

Ett samarbete med TVO påbörjades 1988 beträffande studier av samband mellan lerors mikrostruktur och diffusionsegenskaper. Mätningar sker vid rumstemperatur och förhöjd temperatur med prov i mätceller preparerade vid Clay Technology i Lund. Mätningar med spårämnen sker vid VTT i Helsingfors medan reologi och konduktivitet studeras i Lund.

Ett regelbundet utbyte av erfarenheter och teknik för platsundersökningen sker. Vidare ingår finska representanter i de referensgrupper som finns för Lansjärvsstudien och för det underjordiska berglaboratoriet.

TVO och SKB sammanställer gemensamt tillgänglig kunskap om betydelsen av istider och relaterade fenomen, för analysen av förvarets säkerhet. Vid sidan av detta organiserade samarbete har ett bra informationsutbyte genomförts beträffande deponeringsmetodik, kapselutformning, säkerhetsanalys och kvalitetsvärderingar.

13.9 SAMARBETE MED CEA, FRANKRIKE

13.9.1 Lerfrågor

För närvarande pågår ett samarbete med CEA beträffande lerstudier vilket inleddes 1985. Samarbetet har omfattat koordinering av forskningsprojekt samt informationsutbyte beträffande samband mellan smek-

tiska lerors mikrostruktur, mineralogi mm och inverkan av temperatur och bestrålning. Hydrotermalprov och bestrålning har utförts under årslånga försök i laboratorium. Bestrålningarna har utförts på SKBs referenslera Mx80 och fransk smektisk lera i simulerad kapselmiljö i laboratoriet i Saclay. I Stripa pågår prov med fransk smektisk högkompakterad lera i simulerad deponeringsmiljö vid ca 170 °C. Studier av reologiska egenskaper har utförts i laboratorium i Sverige. Samarbetet har gett goda möjligheter till jämförelser mellan respektive länders referensleror för buffertmaterial, metoder för mätning av egenskaper, svälltryck, hydraulisk konduktivitet, värmeledning etc samt tekniska metoder för deponering. Under 1990 planeras en överborring av ett lerfyllt borrhål i Stripa i vilket prov pågått sedan 1986.

13.9.2 Kemifrågor

Inom ramen för det bilaterala samarbetsavtalet mellan CEA och SKB har experiment genomförts för att ta fram kemiska basdata för aktinider. Likaså har experiment utförts som avser komplexbildningen mellan aktinider och huminämnen. Från SKBs sida har forskare från institutionerna för oorganisk kemi vid KTH och Tema Vatten, Linköpings Universitet deltagit. Samarbetet har resulterat i ett flertal publikationer, se även kapitel 7.

13.10 SAMARBETE MED EURATOM, EG

13.10.1 COCO

Arbetsgruppen COCO (Colloids and Complexes) har bildats av CEC för att utreda betydelsen av colloider och organiska komplex för migrationen av radionuklider. En viktig del av samarbetet är jämförande försök med olika metoder som används på olika laboratorier. SKB stöder medverkan av en svensk specialist, verksam inom området. Huminämnen och colloider är svåra att definiera och man kan således vinna en betydligt ökad insikt genom samarbete av det här slaget.

13.10.2 CHEMVAL

CHEMVAL är ett CEC-projekt för verifiering och validering av kemiska jämviktsberäkningsprogram och kopplade modeller för geokemitransport.

Etapp 1 avsåg att verifiera olika jämviktsprogram mot varandra och Etapp 2 att validera programmen mot naturliga grundvatten.

Etapp 3 är verifiering av kopplade modeller och etapp 4 innebär validering av dessa. Projektet utvecklar också en egen termodynamisk databas, samt gör känslighetsstudier på jämviktsprogram. Etapp 1 och 2 är avslutade, etapp 3 och 4 pågår. Hela projektet beräknas vara avslutat i början av 1990. SKB har haft en grupp med i projektet från Etapp 2 och framåt.

13.11 SAMARBETE INOM OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY

13.11.1 RWMC

Ett 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.

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

Medlem från SKB: Tönis Papp

ISAG (Advisory Group on In Situ Research and Investigations) är rådgivande till RWMC i frågor rörande verksamheten i de olika underjordiska berglaboratorierna.

Medlem från SKB: Bengt Stillborg.

PSAC (Probabilistic Safety Assessment Code) Users Group utgör en samarbetsgrupp mellan de som utvecklar och använder matematiska modeller för probabilistiska analyser av förvaringssystem. 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 samarbete om olika nedläggnings- och rivningsprojekt i hela världen.

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

Expert Group on Geochemical Modelling and Data behandlar frågor av gemensamt intresse inom geokemi, bl a uppbyggnader av en gemensam termodynamisk databas TDB och kompletteringar av databasen för sorptionsdata, SDB. Se avsnitt 13.11.2.

Medlem från SKB: Fred Karlsson.

Stripa-projektet — se kapitel 10. Projektledare och ansvarig för projektadministrationen är Bengt Stillborg.

Medlemmar från SKB: P-E Ahlström (ordf i Joint Technical Committee), Hans Carlsson, SGAB (ledamot av Joint Technical Committee) och Bengt Stillborg (projektledare).

13.11.2 TDB

TDB-projektet (Thermochemical Data Base) leds av OECD/NEA. Målet är att utveckla en kemisk termodynamisk databas för ett antal element som har betydelse för säkerhetsanalysen av slutförvaring av radioaktivt avfall. Utvecklingen av databasen innebär inte enbart en insamling och inlagring av publicerade data utan också en kritisk granskning /13-8, 9, 10, 11, 12/. Granskning genomförs av en för varje element vald grupp av internationella experter. För närvarande pågår granskning av uran, neptunium, plutonium, americium och teknetium. Planer finns att även inkludera palladium, jod, cesium, strontium, radium och bly.

Projekt TDB är ett synnerligen värdefullt initiativ till att utveckla en väldokumenterad, granskad och internationellt accepterad databas. SKB stöder verksamheten och svenska experter deltar i granskningsarbetet. För SKBs del liksom för övriga deltagare kommer det naturligtvis att vara nödvändigt att ha en operationell databas tillgänglig före TDB för olika beräkningsuppgifter. Resultaten från TDB förs emellertid in allt eftersom de blir tillgängliga. Ett bra exempel på detta är Urandatabasen på SKB.

13.12 SAMARBETE INOM IAEA

Inom det internationella atomenergiorganet, IAEA, bedrivs också ett samarbete rörande hantering av radioaktivt avfall.

Samarbetet bedrivs på olika sätt, bl a publiceras rapporter utgörande:

- proceedings från internationella symposier,
- guidelines och standards inom etablerade verksamhetsområden,
- lägesrapporter och metodikbeskrivningar inom viktiga områden under snabb utveckling.

IAEA har nyligen tillsatt en rådgivande expertgrupp för sitt program inom avfallsområdet (the International Waste Management Advisory Committee, INWAG) och arrangerar möjligheter för informationsutbyte inom olika specialområden genom sk Joint Research Programs. IAEA publicerar årligen en katalog över pågående forskningsprojekt inom avfallsområdet i medlemsländerna.

SKB deltar ofta med experter i sammanställningar eller granskning av rapporter enligt ovan och har en observatör, Per-Eric Ahlström, i INWAG.

REFERENSER DEL II

Kapitel 2

2-1 FoU-program 86 1986

Kärnkraftavfallets behandling och slutförvaring.
Program för forskning, utveckling och övriga åtgärder.
SKB, Stockholm

2-2 Granskning av FoU-program 86 1987

SKN, Stockholm

2-3 Kärnbränslecykelns slutsteg Maj 1983

Använt kärnbränsle KBS-3. Del I-IV.
SKBF/KBS, Stockholm

2-4 Röshoff K 1988

Characterization of the morphology, basement rock
and tectonics in Sweden.
SKB Technical Report TR 89-03, Stockholm

2-5 Kornfält K-A, Larsson K 1987

Geological maps and cross-sections of Southern
Sweden.
SKB Technical Report TR 87-24, Stockholm

Kapitel 3

3-1 Andersson J, Carlsson T, Eng T, Kautsky F, Söderman E, Wingefors S 1989

The joint SKI/SKB scenario development project.
(In print)

3-2 Sellin P, Ström A 1989

Modellkatalogen — Datormodeller inom SKBs forsk-
ningsverksamhet.
SKB Arbetsrapport AR 89-04, Stockholm

3-3 Wolery T J 1979

Calculation of chemical equilibrium between aqueous
soluble minerals: the EQ3/6 software package, Law-
rence Livermore National Laboratory.
UCRL-52658

3-4 McKenzie W F, Wolery T J, Delany J M, Silva R, J, Jackson K J, Bourcier W L, Emerson D O 1986

Geochemical modeling (EQ3/6) plan. Office waste

management program, Lawrence Livermore National
Laboratory.
UCID-20864

3-5 Kjellbert N A, Wallin G, Ooppelstrup J 1989

PROPER — A computer package for uncertainty ana-
lysis in performance assessment.
(In print)

3-6 Norman S, Kjellbert N 1989

NEAR 21 — A near field radionuclide migration code
for use with the PROPER package.
(In print)

3-7 Norman S, Söderberg P, Kjellbert N 1989

FARF 31 — A far field radionuclide migration code for
use with the PROPER package.
(In print)

3-8 The geodatabase, introduction to GEOTAB SKB Arbetsrapport AR 89-xx, Stockholm (In print)

3-9 Gentschein B 1986

Description of hydrogeological data in SKBs database
GEOTAB.
SKB Technical Report TR 86-22, Stockholm

3-10 Sehlstedt S 1988

Description of geophysical data in the SKB database
GEOTAB.
SKB Technical Report TR 88-05, Stockholm

3-11 Stark T 1988

Description of geological data in the SKB database
GEOTAB.
SKB Technical Report TR 88-06, Stockholm

3-12 Eriksson E, Sehlstedt S 1989

Description of background data in the SKB database
GEOTAB.
SKB Technical Report TR 89-02, Stockholm

3-13 OECD/NEA Mars 1988

Ad hoc meeting on the Application of Optimization of
Protection in Regulation and Operational Practice.

3-14 Papp T, Sellin A, Ström A
SKB 91
1990-1991 års säkerhetsanalys.
SKB Arbetsrapport AR 89-xx, Stockholm
(In print)

Kapitel 4

- 4-1 Underlagsrapport till FoU-program 86**
Sept 1986
Alternativa slutförvaringsmetoder.
SKB, Stockholm
- 4-2 Alternativa tidplaner för hantering av**
använt kärnbränsle
Dec 1985
Konsekvenser för planering, säkerhet och kostnader.
SKB Arbetsrapport AR 85-18, Stockholm
- 4-3 Granskning av FoU-program 86**
Maj 1987
SKN, Stockholm
- 4-4 NAK WP-Cave Project**
Nov 1985
Report on the research and development stage May
1984 - 1985, Boliden WP Contech AB.
SKN report 16, Stockholm
- 4-5 Vattenfall, BEL**
1988
Storage of nuclear waste in very deep boreholes.
Feasibility study and assessment of economic poten-
tial.
Stage 3: Outline design and quality assurance review.
SKB Arbetsrapport AR 88-56, Stockholm
- 4-6 WP-Cave — assessment of feasibility, safety**
and development potential
SKB Technical Report TR 89-20, Stockholm
(In print)

Kapitel 5

- 5-1 Kärnbränslesäkerhet**
1978
Handling and final storage of unprocessed spent
nuclear fuel.
KBS, Stockholm
- 5-2 Boulton J, ed.**
1978
Management of radioactive fuel wastes: The Canadian
disposal program, Atomic Energy of Canada Ltd.
Report No. AECL-6314.
- 5-3 Johnson L H, Shoesmith D W**
1988
Radioactive waste form for the future, W. Lutze and
R.C. Ewing, eds., Elsevier Science Publishers B.V.

- 5-4 Werme L O, Forsyth R S**
1989
The SKB spent fuel corrosion programme. Status
Report 1988.
SKB Technical Report TR 89-14, Stockholm
- 5-5 Forsyth R S, Werme L O, Bruno J**
1988
J Nucl. Mater. 160 (1988) 218.
- 5-6 Garisto N, Garisto F**
1988
Atomic Energy of Canada Ltd.
Report No. AECL-9562
- 5-7 Skålberg M, Eliasson L, Skarnemark G,**
Torstenfelt B, Forsyth R, Holmér A,
Winqvist B, Allard B
1988
Sci. Tot. Environment 69 (1988) 347.
- 5-8 Puigdomènech I, Bruno J**
1988
Modelling uranium solubilities in aqueous solutions:
Validation of a thermodynamic data base for the
EQ3/6 geochemical codes.
SKB Technical Report TR 88-21, Stockholm
- 5-9 Hallberg R O, Östlund P, Wadsten T**
1988
Appl. Geochem. 3 (1988) 273.
- 5-10 Ekbohm L B, Bogegård S**
1989
Copper produced from powder by HIP to encapsulate
nuclear fuel elements.
SKB Technical Report TR 89-10, Stockholm
- 5-11 Ivarsson B, Österberg J-O**
1988
Creep properties of welded joints in OFHC copper for
nuclear waste containment.
SKB Technical Report TR 88-20, Stockholm
- 5-12 Marsh G P, Bland I D, Taylor K J**
1988
Br. Corros. J. 23 (1988) 157.
- 5-13 Mattsson H, Li C**
1989
Titanium exposed in water saturated bentonite clay:
Exposures ranging up to six years.
SKB Technical Report TR 89-xx, Stockholm
(In print)
- 5-14 Hultquist G**
1986
Corr. Sci. 26 (1986) 173.
- 5-15 Simpson J P, Schenk R**
1987
Corr. Sci. 27 (1987) 1365.

- 5-16 Eriksen T E, Ndalamba P, Grenthe I
1988**
On the corrosion of copper in pure water.
SKB Technical Report TR 88-17, Stockholm.
- 5-17 Technical Advisory Committee to Atomic
Energy of Canada Limited on Nuclear Fuel
Waste Management Program**
Seventh Annual Report, Ontario, Canada, 1986.
- 5-18 Smectite alteration
November 1984**
Proceedings of a workshop convened at the Shoreham
Hotel, Washington, D.C., December 8-9, 1983.
Compiled by Duwayne M Anderson, Texas A & M
University.
SKB Technical Report TR 84-11, Stockholm
- 5-19 Pusch R, Karnland O
June 1988**
Hydrothermal effects on montmorillonite. A prelimi-
nary study.
SKB Technical Report TR 88-15, Stockholm
- 5-20 Erlström M
December 1986**
Pressure solution of minerals in quartz-type buffer
materials.
SKB Technical Report TR 86-28, Stockholm
- 5-21 Pusch R
December 1986**
Settlement of canisters with smectite clay envelopes in
deposition holes.
SKB Technical Report TR 86-23, Stockholm
- 5-22 Pusch R, Børgesson L, Ramqvist G
August 1985**
Final report of the buffer mass test — Volume II: Test
results.
Stripa Project Technical Report TR 85-12, SKB,
Stockholm
- 5-23 Pusch R, Erlström M, Børgesson L
May 1987**
Piping and erosion phenomena in soft clay gels.
SKB Technical Report TR 87-09, Stockholm
- 5-24 Pusch R, Hökmark H
1987**
Megapermeameterstudie av gastransport genom SFR-
buffertar.
SFR Arbetsrapport 87-06, Stockholm
- 5-25 Pusch R, Hökmark H, Børgesson L
June 1987**
Outline of models of water and gas flow through
smectite clay buffers.
SKB Technical Report TR 87-10, Stockholm
- 5-26 Pusch R, Børgesson L, Ramqvist G
January 1987**
Final report of the borehole, shaft, and tunnel sealing
test — Volume I: Borehole plugging.
Stripa Project Technical Report TR 87-01, SKB,
Stockholm
- 5-27 Pusch R, Børgesson L, Ramqvist G
January 1987**
Final report of the borehole, shaft, and tunnel sealing
test — Volume II: Shaft plugging.
Stripa Project Technical Report TR 87-02, SKB,
Stockholm
- 5-28 Pusch R, Børgesson L, Ramqvist G
February 1987**
Final report of the borehole, shaft, and tunnel sealing
test — Volume III: Tunnel plugging.
Stripa Project Technical Report TR 87-03, SKB, Stock-
holm
- 5-29 Pusch R, Erlström M, Børgesson L
December 1985**
Sealing of rock fractures. A survey of potentially
useful methods and substances.
SKB Technical Report TR 85-17, Stockholm
- 5-30 State-of-the-art report on potentially useful
materials for sealing nuclear waste reposi-
tories.
June 1987**
Stripa Project Technical Report TR 87-12, SKB, Stock-
holm
- 5-31 Pusch R, Børgesson L, Erlström M
December 1987**
Alteration of isolating properties of dense smectite
clay in repository environments exemplified by
seven pre-quaternary clays.
SKB Technical Report TR 87-29, Stockholm
- 5-32 Erlström M, Pusch R
December 1987**
Survey of Swedish buffer material candidates and
methods for characterization.
SKB Technical Report TR 87-32, Stockholm
- 5-33 Pusch R, Karnland O
December 1986**
Aspects of the physical state of smectite-adsorbed
water.
SKB Technical Report TR 86-25, Stockholm
- 5-34 Børgesson L, Pusch R
December 1987**
Rheological properties of a calcium smectite.
SKB Technical Report TR 87-31, Stockholm
- 5-35 Børgesson L, Hökmark H, Karnland O
December 1988**
Rheological properties of sodium smectite clay.
SKB Technical Report TR 88-30, Stockholm

5-36 Börgeßon L
December 1986
Modern shear tests of canisters with smectite clay envelopes in deposition holes.
SKB Technical Report TR 86-26, Stockholm

5-37 Börgeßon L
December 1988
Modelling of buffer material behaviour. Some examples of material models and performance calculations.
SKB Technical Report TR 88-29, Stockholm

Kapitel 6

6-1 Bergman S G A, Carlsson A
1986
Förundersökningar i berg. Rekommendationer för förundersökningar, prognoser och utlåtanden.
Stiftelsen BeFo, Stockholm.

6-2 Gustafson G, Stanfors R, Wikberg P
1988
The Swedish Hard Rock Laboratory — First evaluation of pre-investigations 1986-1987 and target area characterization.
SKB Technical Report TR 88-16, Stockholm

6-3 Gustafson G, Stanfors R, Wikberg P
1989
Swedish Hard Rock Laboratory — Evaluation of 1988 year pre-investigations and description of the target area, the island of Äspö.
SKB Technical Report TR 89-16, Stockholm

6-4 Henkel H
1988
Tectonic studies in the Lansjärv region.
SKB Technical Report TR 88-07, Stockholm

6-5 Stone D, Kamineni D C
1988
Recognition of low-intermediate-dip fracture zones at surface; an example from permit area D, Lac Du Bonnet batholith.
AECL TR-465. Pinawa, Manitoba

6-6 Stanfors R
1987
The Bolmen tunnel project. Evaluation of geophysical site investigation methods.
SKB Technical Report TR 87-25, Stockholm

6-7 Dahl-Jensen T, Lindgren J
1987
Shallow reflection seismic investigation of fracture zones in the Finnsjö area, method evaluation.
SKB Technical Report TR 87-13, Stockholm

6-8 AECL
1988
Semi-Annual Status Report of the Canadian nuclear fuel waste management program 1987 October 1-1988 March 31.
AECL TR-425—4, Pinawa, Manitoba

6-9 Gougel J
1987
Stockage des déchets radioactifs en formations géologique, Critères techniques de choix de site. Ministère de l'Industrie de P & T et du Tourisme, Paris

6-10 Ahlbom K, Smellie J (eds)
1989
Characterization of fracture zone 2, Finnsjön study-site.
SKB Technical Report TR 89-19, Stockholm

6-11 Carlsson L, Winberg A, Arnefors J
1986
Hydraulic modelling of the final repository for reactor waste (SFR). Compilation and conceptualization of available geological and hydrogeological data.
SKB Progress Report SFR 86-03, Stockholm

6-12 Olsson O, Palmqvist K
1989
Radar investigations at the Saltsjö tunnel — predictions and validation.
SKB Technical Report TR 89-18, Stockholm

6-13 Andersson P, Andersson P, Gustafsson E, Olsson O
1989
Investigation of flow distribution in a fracture zone, using the radar method.
SKB Technical Report TR 89-xx, Stockholm
(In print)

6-14 Pihl J, Hammarström M, Ivansson S, Morén P
1986
Crosshole investigations — Result from seismic borehole tomography.
Stripa Project Technical Report TR 87-06, SKB, Stockholm

6-15 Cosma, C
1987
Crosshole investigations — short and medium range seismic tomography.
Stripa Project Technical Report TR 87-08, SKB, Stockholm

6-16 Tullborg E-L
1986
Fissure fillings from the Klipperås Study Site.
SKB Technical Report TR 86-10, Stockholm

- 6-17 Bäckblom G, Stanfors R (eds) 1989**
Studies of post-glacial faulting in the Lansjärv area, northern Sweden.
SKB Technical Report TR 89-xx, Stockholm
(In print)
- 6-18 Carlsten S, Olsson O 1989**
Comparison between radar data and geophysical, geological and hydrological borehole parameters by multivariate analysis of data.
SKB Technical Report TR 89-15, Stockholm
- 6-19 Neuman S H 1988**
A conceptual framework and methodology for investigating flow and transport in Swedish crystalline rocks.
SKB Arbetsrapport AR 88-37, Stockholm
- 6-20 Osnes J D, Winberg A, Andersson J E 1989**
Analysis of well-test data — application of probabilistic models to infer hydraulic properties of fractures.
SKB Technical Report TR 89-xx, Stockholm
(In print)
- 6-21 Carlsson L, Grundfelt B, Winberg A 1987**
Hydraulic modelling of final repository for reactor waste (SFR).
SKB Progress Report SFR 86-07, Stockholm
- 6-22 Martin C D, Christiansson R, Kroll D W 1989**
In situ measurements in highly stressed granite. Part I — Comparison of USBM and modified CSIR overcore devices.
SKB Arbetsrapport AR 88-43, Stockholm
- 6-23 Christiansson R 1989**
Bergspänningsmätning genom överborrning — fördelar och begränsningar. Bergmekanikdagen 1989, 33-56.
Stiftelsen BeFo, Stockholm
- 6-24 Carlsson H, Carlsson L, Pusch R 1989**
Rock quality designation of the hydraulic properties in the near field of a final repository for spent nuclear fuel.
SKB Technical Report TR 89-21, Stockholm
(In print)
- 6-25 Abelin H, Neretnieks I, Tunbrant S, Moreno L 1985**
Final report of the migration in a single fracture — Experimental results and evaluation.
Stripa Project Technical Report TR 85-03, SKB, Stockholm
- 6-26 Abelin H 1986**
Migration in a single fracture. An in-situ experiment in a natural fracture, Ph.D. Thesis.
Department of Chemical Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- 6-27 Abelin H, Birgersson L, Gidlund J, Moreno L, Neretnieks I, Widén H, Ågren T 1987**
Part I 3-D migration experiment — Report 3 performed experiments, results and evaluation.
Stripa Project Technical Report TR 87-21, SKB, Stockholm
- 6-28 Moreno L, Neretnieks I 1988**
Channelling in fractured zones and its potential impacts on transports of radionuclides. Symp scientific basis for nuclear waste management, Berlin.
- 6-29 Palmqvist K, Stanfors R 1987**
The Kymmen power station — TBM tunnel. Hydrogeological mapping and analysis.
SKB Technical Report TR 87-26, Stockholm
- 6-30 Pusch R 1989**
Alteration of the hydraulic Conductivity of rock by tunnel excavation.
Int J Rock Mech. Vol 26, No 1, 79, 83
- 6-31 Winberg A, Chan T, Griffiths P, Nakka B 1989**
Post-excavation analysis of a revised Room 209 fracture. A part of the joint AECL/ SKB characterization of the 240 level at the URL, Manitoba, Canada.
SKB Technical Report TR 89-xx, Stockholm
(In Print)
- 6-32 Rhen I, Åkesson J Å 1988**
Hylteprojektet. Geologisk undersökning av sprickzon vid Hylte kraftverk.
SKB Arbetsrapport AR 88-26, Stockholm
- 6-33 Larsson N Å, Markström A 1988**
Groundwater numerical modelling of the Fjällveden study site — Evaluation of parameter variations. A HYDROCOIN study — Level 3, case 5A.
SKB Technical Report TR 88-11, Stockholm
- 6-34 Bear J 1979**
Hydraulics of groundwater.
McGraw-Hill

- 6-35 Lindbom B, Lundblad K, Winberg A**
1989
Parameter variations of the groundwater flow modelling at the Klipperås site; Regional and subregional scale.
SKB Arbetsrapport AR 89-05, Stockholm
- 6-36 Thunvik R, Braester C**
1988
GWHRT — A flow model for coupled groundwater and heat flow — version 1.0.
SKB Technical Report TR 88-10, Stockholm
- 6-37 Thunvik R**
1987
Calculations on Hydrocoin level 1 using the GWHRT flow model. Case 1,3 and 4.
SKB Technical Report TR 87-03, Stockholm
- 6-38 Thunvik R**
1987
Calculations on Hydrocoin level 2, case 1 using the GWHRT flow model.
SKB Technical Report TR 87-04, Stockholm
- 6-39 OECD/NEA**
1988
The international HYDROCOIN project — Level 1: Code verification.
- 6-40 Andersson J, Dverstorp B**
1987
3-D migration experiment — Report 4 fracture network modelling of the Stripa 3-D Site.
Stripa Project Technical Report TR 87-22, SKB, Stockholm
- 6-41 Andersson J**
1988
Application of discrete fracture network models at site characterization and safety analyses.
SKB Arbetsrapport AR 88-35, Stockholm
- 6-42 Gelhar L W**
1987
Applications of stochastic models to solute transport in fractured rocks.
SKB Technical Report TR 87-05, Stockholm
- 6-43 Golder Associates Inc**
1989
Fracture flow code — Cross-verification plan — Revision 1.0.
Golder Associates, Redmond WA.
- 6-44 Herbert A W**
1988
NAPSAC stochastic fracture network modelling code: Technical summary.
Release 1A AERE Harwell Laboratory
- 6-45 Golder Associates Inc**
1988
MAFIC version 1.0: Matrix and fracture interaction code: User documentation.
Golder Associates, Redmond WA
- 6-46 Golder Associates Inc**
1988
FracMan version 2.0: Interactive rock fracture geometric model: User documentation.
Golder Associates, Redmond WA
- 6-47 Moreno L, Tsang Y, Tsang C F, Neretnieks I**
1988
Flow and solute transport in a single fracture. A two-dimensional statistical model.
SKB Technical Report TR 88-03, Stockholm
- 6-48 Paige R W, Piper D**
1988
Capabilities and requirements for modelling radionuclide transport in the geosphere.
UK/DOE/RW/89/024/, London
- 6-49 Ahlbom K, Andersson P, Ekman L, Gustafsson E, Smellie J, Tullborg E-L**
1986
Preliminary investigations of fracture zones in the Brändan area, Finnsjön study site.
SKB Technical Report TR 86-05, Stockholm
- 6-50 Gentzchein B, Nilsson G, Stenberg L**
1987
Preliminary investigations of fracture zones at Ävrö — results of investigations performed July 1986 — May 1987.
SKB Progress Report PR 25-87-16, Stockholm
- 6-51 Pusch R, Börgesson L, Ramqvist G**
1985
Final report of the buffer mass test — Volume II: test results.
Stripa Project Technical Report TR 85-12, SKB, Stockholm
- 6-52 Thunvik R, Braester C**
1987
Calculation of gas migration in fractured rock.
SKB Technical Report TR 87-18, Stockholm
- 6-53 Braester C, Thunvik R**
1987
Calculation of gas migration in fractured rock — a continuum approach.
SKB Technical Report TR 87-19, Stockholm
- 6-54 Hakami E**
1988
Water flow in single rock joints. Licentiate Thesis 1988:11L.
Tekniska Högskolan i Luleå, Luleå

- 6-55 Thunvik R Bao Y-B**
1989
GWHRT-S — Documentation of computer program for sensitivity analysis of groundwater flow, Version 1.0.
SKB Arbetsrapport AR 88-55, Stockholm
- 6-56 Heinrich W F (ed)**
1984
Proc workshop on transitional processes. Ottawa 1982.
AECL-7822. Pinawa, Manitoba
- 6-57 Nurmi P**
1985
Mahdolliset ympäristöolosuhteiden pitkäaikaismuutokset Suomessa ja niiden vaikutukset syvällä oleviin kalliopohjavesiin.
TVO YJT 85-21, Helsingfors
- 6-58 Gregersen S, Basham P W (eds)**
1989
Earthquakes at north-Atlantic passive margins: Neotectonic and glacial rebound.
NATO ASI C266, Kluwer, London
- 6-59 Holmes R (ed)**
1989
Report on a seminar on natural environmental change, April 1988, London.
Technical Report TR-D&M-13, Dames & Moore, London
- 6-60 Gaál G, Gorbatshev R**
1987
An outline of the precambrian evolution of the Baltic shield.
Precambrian Research, Vol 35 15—52
- 6-61 Röshoff K**
1989
Characterization of morphology, basement rock and tectonics in Sweden.
SKB Technical Report TR 89-03, Stockholm
- 6-62 Ziegler P**
1988
Evolution of the Arctic-North Atlantic AAPG Memoir 43.
Tulsa, USA
- 6-63 Slunga R**
1985
The seismicity of southern Sweden, 1979-1984, final report.
FOA Report C 20578-T1, ISSN 0347-3694, Stockholm
- 6-64 Slunga R, Nordgren**
1987
Earthquake measurements in southern Sweden Oct 1, 1986 — Mar 31, 1987.
SKB Technical Report TR 87-27, Stockholm
- 6-65 Slunga R**
1989
Earthquake measurements in northern Sweden Oct 1987 — Apr 1988.
SKB Technical Report TR 89-xx, Stockholm (In print)
- 6-66 Stephansson O**
1987
Modelling of crustal rock mechanics for radioactive waste storage in Fennoscandia — Problem definition.
SKB Technical Report TR 87-11, Stockholm
- 6-67 Kakkuri J**
1986
Newest results obtained in studying the Fennoscandian land uplift phenomenon.
Tectonophysics 130, 327—331
- 6-68 Wakita H, Sano Y, Mizoue M**
1987
High ³He emanations and seismic swarms observed in a nonvolcanic, forearc region.
Journal Geophysical Res 92, No B12,12539—12546
- 6-69 Ikeya M, Miki T, Tanaka K**
1982
Dating of a fault by electron spin resonance on intra-fault material.
Science 1982, V 215, 1392—1393
- 6-70 Tirén S, Beckholmen M**
1989
Block faulting in southeastern Sweden interpreted from digital terrain models.
GFF Vol 111, Pt 2, 171—180, Stockholm
- 6-71 Johnston A C**
1987
Suppression of earthquakes by large continental ice sheets.
Nature, 330, 467—469
- 6-72 Mörner N A**
1988
Kärnavfall i berg är otänkbart.
Dagens Nyheter DN Debatt. 23 sept 1988, Stockholm
- 6-73 Peltonen E, Ryhänen V H, Salu J P, Vieno T K, Vuori S J**
March 1986
Concept and safety assessment for spent fuel disposal in Finland. Int symp siting, design and construction of underground repositories for radioactive waste.
Hanover, IAEA-SM-289/28
- 6-74 SKBF/KBS**
1983
Final storage of spent nuclear fuel KBS-3. Volumes I-IV.
SKBF/KBS, Stockholm

- 6-75 Talbot C
1986**
A preliminary structural analysis of pattern of post-glacial faults in northern Sweden.
SKB Technical Report TR 86-20, Stockholm
- 6-76 Lagerbäck R**
Postglacial faulting and paleoseismicity in the Lansjärv area, northern Sweden.
SKB Technical Report TR 88-25, Stockholm
- 6-77 Wahlström R, Linder S-O, Holmqvist C
1988**
Near-distance seismological monitoring of the Lansjärv neotectonic fault region.
SKB Technical Report TR 88-12, Stockholm
- 6-78 Stephansson O, Savilahti T
1988**
Validation of the rock mechanics HNFEMP code against Colorado School of Mines block test data.
SKB Technical Report TR 88-13, Stockholm
- 6-79 Barton N, Chryssanthakis P, Monsen K
1988**
Validation of MUDEC against Colorado School of Mines block test data.
SKB Technical Report TR 88-14, Stockholm
- 6-80 Röshoff K
1989**
Seismic effects on underground constructions, groundwater levels and chemistry.
SKB Technical Report TR 89-xx, Stockholm
(In print)
- 6-81 Nordenskjöld C E
1944**
Morfologiska studier inom övergångsområdet mellan Kalmar och Tjust.
Medd Lunds geol Inst. Avh VIII. Lund
- 6-82 Svensson N
1989**
Late weichselian and early holocene shore displacements in the central Baltic, based on stratigraphical and morphological records from eastern Småland and Gotland, Sweden.
Lundqua thesis, Vol 25, Lund University, Lund
- 6-83 Bowman J R
1988**
Constraints on locations of large intraplate earthquakes in the northern territory, Australia from observations at the Warramunga seismic array.
Geoph Res Letters, Vol 15, No 13, 1475—1478
- 6-84 Andersson J E, Lindqvist L
1989**
Prediction of hydraulic conductivity and conductive fracture frequency by multivariate analysis of data from the Klipperås study site.
SKB Technical Report TR 89-11, Stockholm

Kapitel 7

- 7-1 Stumm W, Morgan J
1981**
Aquatic Chemistry.
2nd ed. (John Wiley & Sons, New York)
- 7-2 Nordstrom D K (ed), Andrews J, Carlsson L, Fontes J, Fritz P, Moser H, Olsson T
July 1985**
Hydrogeological and hydrogeochemical investigations in boreholes — Final report of Phase 1: Geochemical investigations of the Stripa groundwaters.
Stripa Project Technical Report TR 85-06, SKB, Stockholm
- 7-3 Wikberg P, Axelsen K, Fredlund F
1987**
Deep groundwater chemistry.
SKB Technical Report TR 87-07, Stockholm
- 7-4 Magnusson N, Lundqvist G, Ganlund E
1957**
Sveriges geologi.
3rd ed, Nordstedts förlag, Stockholm
- 7-5 Gustafson G, Stanfors R, Wikberg P
1989**
Swedish Hard Rock Laboratory: Evaluation of 1988 year pre-investigations and description of the target area, the island of Åspö.
SKB Technical Report TR 89-16, Stockholm
- 7-6 Laaksoharju M, Nilsson A-C
1989**
Models of groundwater composition and of hydraulic conditions based on chemometrical and chemical analyses of deep groundwater at Åspö and Laxemar.
SKB Progress Report PR 25-89-04, Stockholm
- 7-7 Wikberg P, Laaksoharju M, Bruno J, Sandino A
September 1988**
Site characterization and validation — Hydrochemical investigations in stage I.
Stripa Project Internal Report IR 88-09, SKB, Stockholm
- 7-8 Neretnieks I
1986**
“Some uses for natural analogues in assessing the function of a HLW repository” in natural analogues to the conditions around a final repository for high-level radioactive waste.
Chem. Geol., 55, 175
- 7-9 Wikberg P
1987**
Thesis: The chemistry of deep groundwaters in crystalline rocks.
Royal Institute of Technology, Stockholm

- 7-10 Tullborg E-L**
1986
Fissure fillings from Klipperås study site.
SKB Technical Report TR 86-10, Stockholm
- 7-11 Laaksoharju M**
1988
Shallow groundwater chemistry at Laxemar, Äspö and Ävrö.
SKB Progress Report PR 25-88-04, Stockholm
- 7-12 Nordstrom D K, Puigdomènech I**
April 1986
Redox chemistry of deep groundwaters in Sweden.
SKB Technical Report TR 86-03, Stockholm
- 7-13 Puigdomènech I, Nordstrom K**
August 1987
Geochemical interpretation of groundwaters from Finnsjön, Sweden.
SKB Technical Report 87-15, Stockholm
- 7-14 Tardy Y, Duplay J, Fritz B**
April 1987
Stability fields of smectites and illites as a function of temperature and chemical composition.
SKB Technical Report TR 87-20, Stockholm
- 7-15 Fritz B, Made' B, Tardy F**
April 1988
Geochemical modelling of the evolution of a granite-concrete-water system around a repository for spent nuclear fuel.
SKB Technical Report TR 88-18, Stockholm
- 7-16 Andrews J, Fontes J-C, Fritz P, Nordstrom K**
August 1988
Hydrogeochemical assessment of crystalline rock for radioactive waste disposal: The Stripa experience.
Stripa Project Technical Report TR 88-05, SKB, Stockholm
- 7-17 Bruno J, Casas I, Grenthe I and Lagerman B**
1987
Studies on metal carbonate complexes 19. Complex formation in the Th(IV)-H₂O-CO₂(g) system.
Inorganica Chimica Acta 140 (1987) 299—301
- 7-18 Bruno J, Grenthe I and Robouch P**
1988
Studies of metal carbonate equilibria 21. Formation of tetra carbonate uranium(IV)ion, U(CO₃)₄⁴⁻, in hydrogen carbonate solutions.
Inorganica Chimica Acta (to be published)
- 7-19 Riglet Ch, Vitorge P, Grenthe I**
1987
Standard potentials of the (MO₂²⁺/MO₂⁺) systems for uranium and other actinides.
Inorganica Chimica Acta, 133(1987)323—329
- 7-20 Grenthe I, Bidoglio G, Omenetto N**
1988
Use of thermal lensing spectrophotometry (TLS) for the study of mononuclear hydrolysis of uranium(IV).
Inorganic Chemistry 28(1989)71—74
- 7-21 Puigdomènech I, Bruno J**
October 1988
Modelling of uranium solubilities in aqueous solutions: Validation of a thermodynamic data base for the EQ3/6 geochemical codes.
SKB Technical Report TR 88-21, Stockholm
- 7-22 Bruno J, Puigdomènech I**
1988
Validation of the SKBUI uranium thermodynamic data base for its use in geochemical calculations with EQ3/6 in scientific basis for nuclear waste management XIII; Berlin.
- 7-23 Bruno J, Sandino A**
December 1987
Radionuclide co-precipitation
SKB Technical Report TR 87-23, Stockholm
- 7-24 Tjus K, Wikberg P**
March 1987
Study of groundwater colloides and their ability to transport radionuclides.
SKB Technical Report TR 87-12, Stockholm
- 7-25 Marinsky J A, Reddy M M, Ephraim J, Mathuthu A**
April 1988
Ion binding by humic and fulvic acids: A computational procedure based on functional site heterogeneity and the physical chemistry of polyelectrolyte solutions.
SKB Technical Report TR 88-04, Stockholm
- 7-26 Moulin V, Robouch P, Vitorge P, Allard B**
1987
Spectrophotometric study of the interaction between americium(III) and humic materials.
Inorganica Chimica Acta 140(1987)303—306
- 7-27 Allard B, Moulin V, Basso L, Tran M T, Stammose D**
1987
Americium adsorption on alumina in the presence of humic materials.
In impact de la Physico-Chimie sur l'Etude, la conception et l'optimisation de procedes en milieu naturel.
Presses Universitaires de Nancy, p 277—283
- 7-28 Pedersen K**
December 1988
Preliminary investigations of deep groundwater microbiology in Swedish granitic rock.
SKB Technical Report TR 88-01, Stockholm

- 7-29 Torstenfelt B**
April 1986
Migration of fission products and actinides in compacted bentonite.
SKB Technical Report TR 86-14, Stockholm
- 7-30 Ittner T, Torstenfelt B, Allard B**
Januari 1988
Migration of the fission products strontium technetium, iodine, cesium and the actinides neptunium, plutonium, americium in granitic rock.
SKB Technical Report TR 88-02, Stockholm
- 7-31 Eriksen T, Locklund B**
November 1987
Radionuclide sorption on granitic drill core material.
SKB Technical Report TR 87-22, Stockholm
- 7-32 Eriksen T, Christensen H, Bjergbakke E**
March 1986
Hydrogen production in alfa irradiated bentonite.
SKB Technical Report TR 86-04, Stockholm
- 7-33 Eriksen T, Christensen H, Bjergbakke E**
1987
Hydrogen production in alfa irradiated bentonite.
Journal of Radiolytical and Nuclear Chemistry, Vol 116 No 1(1987)13—25
- 7-34 Eriksen T, Ndalamba P**
December 1988
On the formation of a moving redox front by alfa radiolysis of compacted water saturated bentonite.
SKB Technical Report TR 88-27, Stockholm
- 7-35 Eriksen T, Christensen H, Bjergbakke E**
December 1988
Radiolysis of groundwater: Influence of carbonate and chloride on the hydrogen peroxide production.
SKB Technical Report TR 88-22, Stockholm
- 7-36 Rasmuson A, Neretnieks I**
March 1985
Radionuclide transport in fast channels in crystalline rock.
SKB Technical Report TR 86-13, Stockholm
- 7-37 Tsang Y W, Tsang C F, Neretnieks I**
December 1986
Some properties of a channeling model of fracture flow.
SKB Technical Report TR 87-06, Stockholm
- 7-38 Moreno L, Tsang Y W, Tsang C F, Neretnieks I**
January 1988
Flow and solute transport in a single fracture. A two-dimensional statistical model.
SKB Technical Report TR 88-03, Stockholm
- 7-39 Birgersson L, Neretnieks I**
April 1988
Diffusion in the matrix of granitic rock. Field test in the Stripa mine. Final report.
SKB Technical Report TR 88-08, Stockholm
- 7-40 Zhu M**
January 1988
Some aspects of modelling of the migration of chemical species in groundwater systems.
Licentiate Theses, Royal Institute of Technology, Stockholm
- 7-41 Zhu M, Rasmuson A, Neretnieks I**
July 1988
Annual report on chemistry and chemical transport. Report to SKB
- 7-42 Eriksen T**
December 1988
Radionuclide transport in a single fissure. A laboratory flow system for transport under reducing conditions.
SKB Technical Report TR 88-28, Stockholm

Kapitel 8

- 8-1 Gustafsson G, Stanfors R, Wikberg P**
1988
Swedish Hard Rock Laboratory first evaluation of pre-investigations 1986-87 and target area characterization.
SKB Technical Report TR 88-16, Stockholm
- 8-2 Barmen G, Stanfors R**
1988
Ground level geophysical measurements on the island of Äspö.
SKB Progress Report PR 25-88-16, Stockholm
- 8-3 Nisca D, Triumf C-A**
1989
Detailed geomagnetic and geoelectric mapping of Äspö.
SKB Progress Report PR 25-89-01, Stockholm
- 8-4 Ploug C, Klitten K**
1988
Shallow reflection seismic profiles from Äspö, Sweden.
SKB Progress Report PR 25-89-02, Stockholm
- 8-5 Almén K-E, Andersson O, Fridh B, Johansson B-E, Sehlstedt M, Gustafsson E, Hansson K, Olsson O, Nilsson G, Axelsen K, Wikberg P**
1986
Site investigation — Equipment for geological, geophysical, hydrogeological and hydrochemical characterization.
SKB Technical Report TR 86-16, Stockholm

- 8-6 Stråhle A
1988**
Drill core investigation in the Simpevarp area, boreholes KAS 02, KAS 03, KAS 04 and KLX 01.
SKB Progress Report PR 25-88-07, Stockholm
- 8-7 Sehlstedt S, Stråhle A
1988**
Geological core mapping and geophysical borehole logging in the boreholes KAS 05 — KAS 08 at Äspö.
SKB Progress Report PR 25-89-09, Stockholm.
- 8-8 Olsson O, Falk L, Forslund O, Lundmark L, Sandberg E
1987**
Crosshole investigations — results from borehole radar investigations
Stripa Project Technical Report TR 87-11, SKB, Stockholm
- 8-9 Olsson O, Eriksson J, Falk L, Sandberg E
1988**
Site characterization and validation — Borehole radar investigations, stage 1.
Stripa Project Technical Report TR 88-03, SKB, Stockholm
- 8-10 Cosma C
1987**
Crosshole investigations — Short and medium range seismic tomography.
Stripa Project Technical Report TR 87-08, SKB, Stockholm
- 8-11 Stenberg L
1987**
Detailed investigations of fracture zones in the Brändan area, Finnsjön study site. Investigations with the tubewave method in boreholes Fi 6 and BFi 1.
SKB Arbetsrapport AR 87-27, Stockholm
- 8-12 Nilsson L
1988**
Hydraulic tests at Äspö and Laxemar — Evaluation.
SKB Progress Report PR 25-88-14, Stockholm
- 8-13 Rhén I
1989**
Transient interference tests on Äspö.
SKB Progress Report PR 25-88-13, Stockholm
- 8-14 Gustafson E
1987**
Groundwater flow measurements in fractured crystalline rock by point dilution.
SKB Technical note.
- 8-15 Laaksoharju M, Nilsson A-C
1989**
Chemical characterization and modelling of deep groundwater at Äspö and Laxemar.
SKB Progress Report PR 25-89-04, Stockholm
- 8-16 Wikberg P
1987**
The chemistry of deep groundwaters in crystalline rocks.
Royal Institute of Technology, Stockholm
- 8-17 Ahlbom K, Andersson P, Ekman L, Tirén S
1988**
Characterization of fracture zones in the Brändan area Finnsjön study site, central Sweden.
SKB Arbetsrapport AR 88-09, Stockholm
- 8-18 Abelin H, Birgersson L, Gidlund J
1987**
3-D Migration experiment — Report 2, instrumentation and tracers.
Stripa Project Technical Report TR 87-20, SKB, Stockholm
- 8-19 Bjarnason B, Torikka A
1989**
Field instrumentation for hydrofracturing stress measurements.
SKB Technical Report TR 89-17, Stockholm
- 8-20 Carlsten S, Olsson O, Persson O, Sehlstedt M
1988**
Site characterization and validation — Monitoring of head in the Stripe mine during 1987.
Stripa Project Internal Report IR 88-02, SKB, Stockholm
- 8-21 Holmes D, Sehlstedt M
1987**
Crosshole investigations — Details of the construction and operation of the hydraulic testing system.
Stripa Project Technical Report TR 87-04, SKB, Stockholm

Kapitel 9

- 9-1 Gustafson G, Stanfors R, Wikberg P
1988**
Swedish Hard Rock Laboratory — first evaluation of preinvestigations 1986-87 and target area characterization.
SKB Technical Report TR 88-16, Stockholm
- 9-2 Gustafson G, Stanfors R, Wikberg P
1989**
Swedish Hard Rock Laboratory — Evaluation of 1988 year pre-investigations and description of the target area, the island of Äspö.
SKB Technical Report TR 89-16, Stockholm

Kapitel 10

10-1. Executive Summary of Phase 1 July 1986

Stripa Project Technical Report TR 86-04, SKB, Stockholm

10-2. Executive Summary of Phase 2 February 1989

Stripa Project Technical Report TR 89-01, SKB, Stockholm

10-3. Program for the Stripa Project Phase 3 1986—1991 May 1987

Stripa Project Technical Report TR 87-09, SKB, Stockholm

10-4. Holmes D, Sehlstedt M May 1986

Crosshole investigations — Details of the construction and operation of the hydraulic testing system.

Stripa Project Technical Report TR 87-04, SKB, Stockholm

10-5. Olsson O, Falk L, Forslund O, Lundmark L, Sandberg E May 1987

Crosshole investigations — Results from borehole radar investigations.

Stripa Project Technical Report TR 87-11, SKB, Stockholm

10-6. Bjarnason B, Raillard G July 1987

Rock stress measurements in borehole V3.

Stripa Project Internal Report IR 87-13, SKB, Stockholm

10-7. Fridh B December 1987

Site characterization and validation — Geophysical single hole logging.

Stripa Project Technical Report TR 87-17, SKB, Stockholm

10-8. Black J, Holmes D, Brightman M December 1987

Crosshole investigations — Hydrogeological results and interpretations.

Stripa Project Technical Report TR 87-18, SKB, Stockholm

10-9. Noy D, Barker J, Black J, Holmes D February 1988

Crosshole investigations — Implementation and fractional dimension interpretation of sinusoidal tests.

Stripa Project Technical Report TR 88-01, SKB, Stockholm

10-10. Carlsten S, Olsson O, Persson O, Sehlstedt M April 1988

Site characterization and validation — Monitoring of head in the Stripa mine during 1987.

Stripa Project Internal Report IR 88-02, SKB, Stockholm

10-11. Olsson O, Eriksson J, Falk L, Sandberg E April 1988

Site characterization and validation — Borehole radar investigations, stage I.

Stripa Project Technical Report TR 88-03, SKB, Stockholm

10-12. Cosma C, Korhonen R, Hammarström M, Norén P, Pihl J September 1988

Site characterization and validation — Results from seismic crosshole and reflection measurements, stage 1.

Stripa Project Internal Report IR 88-07, SKB, Stockholm

10-13. Vik G, Barton N August 1988

Stage 1 Joint characterization and Stage 2 Preliminary prediction using small core samples.

Stripa Project Internal Report IR 88-08, SKB, Stockholm

10-14. Wikberg P, Laaksoharju M, Bruno J, Sandino A September 1988

Site characterization and validation — Hydrochemical investigations in stage 1.

Stripa Project Internal Report IR 88-09, SKB, Stockholm

10-15. Gale J, Strähle A September 1988

Site characterization and validation — Drift and borehole fracture data, stage I.

Stripa Project Internal Report IR 88-10, SKB, Stockholm

10-16. Olsson O, Black J, Gale J, Holmes D May 1989

Site characterization and validation Stage 2 — Preliminary predictions.

Stripa Project Technical Report TR 89-03, SKB, Stockholm

10-17. Abelin H, Neretnieks I, Tunbrant S, Moreno L May 1985

Final report of the migration in a single fracture — Experimental results and evaluation.

Stripa Project Technical Report TR 85-03, SKB, Stockholm

**10-18. Abelin H
1986**

Migration in a single fracture. An in-situ experiment in a natural fracture.
Ph.D. Thesis, Department of Chemical Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm

**10-19. Annual Report 1988
May 1989**

Stripa Project Technical Report TR 89-05, SKB, Stockholm

**10-20. State-of-the-art report on potentially useful materials for sealing nuclear waste repositories
June 1987**

Stripa Project Technical Report TR 87-12, SKB, Stockholm

**10-21. Pusch R, Börgesson L, Fredrikson A, Markström I, Erlström M, Ramqvist G, Gray M, Coons W
September 1988**

Rock sealing — Interim report on the rock sealing project (Stage I).
Stripa Project Technical Report TR 88-11, SKB, Stockholm

**10-22. Pusch R
March 1988**

Rock sealing — Large scale field test and accessory investigations.
Stripa Project Technical Report TR 88-04, SKB, Stockholm

Kapitel 11

**11-1 IAEA
1987**

A review of the use of natural analogues in performance assessments of deep underground repositories for long-lived radioactive wastes.
IAEA Technical Report Series (8000W), Vienna.

**11-2 Goodwin B W, Cramer J J, McConnell DB
1988**

The Cigar Lake uranium deposit; An analogue for nuclear fuel waste disposal.
In third CEC meeting of the Natural Analogue Working Group (NAWG) Snowbird, Utah, June 15-17.

**11-3 Smellie J
1988**

Swedish natural analogue studies and their applications.
In joint Sino-Japanese seminar on the implication of natural analogues to the safety of radioactive waste disposal. Organized by Taiwan Radwaste Administration — Energy Council. Taipei, Taiwan, December 9.

Kapitel 12

**12-1 Evans S
October 1986**

Quantitative estimates of sedimentation rates and sediment growth in two Swedish lakes.
Studsvik Energiteknik AB, Nyköping
SKB Technical Report TR 86-29, Stockholm

**12-2 Sundblad B
December 1986**

Recipient evolution — Transport and distribution of elements in the lake Sibbo-Trobbofjärden area.
Studsvik Energiteknik AB, Nyköping
SKB Technical Report TR 86-30, Stockholm

**12-3 Andersson, K
Augusti 1987**

Watercomposition in the lake Sibbofjärden, lake Trobbofjärden area.
Studsvik Energiteknik AB, Nyköping
SKB Technical Report TR 87-30, Stockholm

**12-4 Bergström, U, Evans S, Puigdomènech I, Sundblad B
September 1988**

Long-term dynamics of a lake ecosystem and the implications for radiation exposure.
Studsvik Nuclear, Nyköping
SKB Technical Report TR 88-31, Stockholm

**12-5 Carbol P, Eriksson N, Gustafsson E, Ittner T, Karlberg O, Lampe S, Skålberg M, Sundblad B, Tullborg E-L
December 1987**

Radionuclide deposition and migration within the Gideå and Finnsjön study sites, Sweden: A study of the fallout after the Chernobyl accident. Phase I, initial survey.
SKB Technical Report TR 87-28, Stockholm

**12-6 Ittner T, Gustavsson E
1989-03-01**

Lägesrapport avseende 1988 års aktiviteter inom projektet; Nedfallstudier i Gideå och Finnsjöområdet efter Tjernobylolyckan 1986.
Arbetsrapport SGAB 89209

**12-7 Dames and Moore
January 1989**

Report of a seminar on "Natural environmental change".
UKDOE report no DOE/RW/89.029

**12-8 Carbol P, Ittner T, Skålberg M
1988**

Radionuclide deposition and migration of the Chernobyl fallout in Sweden.
Radiochimica Acta 44/45, 207—212

12-9 Suolanen V, Vieno T
September 1987
Development of biosphere scenarios for safety analysis of spent nuclear fuel disposal.
Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies.
Report YJT-87—13

12-10 Elert M, Argärde A-C
1985
Modelling of the interface between the geosphere and the biosphere — Discharge through a sediment layer.
Project SSI P295—84.
Swedish National Institute of Radiation Protection, Stockholm.

12-11 Elert M, Argärde A-C, Ericsson A-M
December 1988
Modelling of the interface between the geosphere and the biosphere: Discharge through a soil layer.
Kemakta Konsult AB, Stockholm
KEMAKTA AR 88-23

12-12 Häss C, Johansson G
1987
BIOMOVS: An international model validation study.
SSI rapport 87-32

12-13 Thorne M C
June 1988
The biosphere: Current status.
Electrowatt Engineering Services (UK) LTD, West Sussex.
HL89/1085

Kapitel 13

13-1 JSS Project Phase IV: Final Report
1987
Experimental and modelling studies of HLW glass dissolution in repository environments.
JSS Project Technical Report 87-01, SKB, Stockholm

13-2 Grambow B
1987
Nuclear waste glass dissolution: Mechanism, model and application.
JSS Project Technical Report 87-02, SKB, Stockholm

13-3 JSS Project Phase V: Final Report
1988
Testing and modelling of the corrosion of simulated nuclear waste glass powders in a waste package environment.
JSS Project Technical Report 88-02, SKB, Stockholm

13-4 Jercinovic M J, Ewing R C
1988
Basaltic glasses from Iceland and the deep sea: Natural analogues to borosilicate nuclear waste-form glass.
JSS Project Technical Report 88-01, SKB, Stockholm

13-5 Thunvik R, Braester C
1988
GWHRT — A flow model for coupled groundwater and heat flow version 1.0.
SKB Technical Report TR 88-10, Stockholm

13-6 Thunvik R
1987
Calculations on HYDROCOIN level 2, case 1 using the GWHRT flow model. Thermal convection and conduction around a field heat transfer experiment.
SKB Technical Report TR 87-04, Stockholm

13-7 Larsson N-Å, Markström A
1988
Groundwater numerical modelling of the Fjällveden study site — Evaluation of parameter variations. A HYDROCOIN study — Level 3, case 5A.
SKB Technical Report 88-11, Stockholm

13-8 Wanner H
1988
The NEA Thermodynamical Data Base Project.
OECD/NEA Report TDB-0

13-9 Wanner H
1988
Guidelines for the review procedure and data selection.
OECD/NEA Report TDB-1

13-10 Grenthe I, Wanner H
1988
Guidelines for the extrapolation to zero ionic strength.
OECD/NEA Report TDB-2

13-11 Wanner H
Guidelines for the assignment of uncertainties.
OECD/NEA Report TDB-3

13-12 Wanner H
Standards and conventions for TDB publications.
OECD/NEA Report TDB-5

