



---

UNDERLAGSRAPPORT TILL  
FUD-PROGRAM 92

---

# **Kärnkraftavfallets behandling och slutförvaring**

**Detaljerat FoU-program 1993-1998**

September 1992

---

**SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING AB**

BOX 5864 S-102 48 STOCKHOLM

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

UNDERLAGSRAPPORT TILL  
FUD-PROGRAM 92

# **Kärnkraftavfallets behandling och slutförvaring**

**Detaljerat FoU-program 1993–1998**

September 1992

## FÖRORD

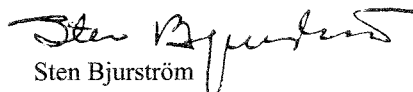
Lagen om kärnteknisk verksamhet (SFS 1984:3) föreskriver i sin 12 § att ett program skall upprättas för den allsidiga forsknings- och utvecklingsverksamhet och de övriga åtgärder som behövs för att på ett säkert sätt hantera och slutförvara det radioaktiva avfallet m m från kärnkraftverken. Skyldigheten åligger primärt ägarna till kärnkraftverken. Dessa har uppdragit åt SKB att utarbeta det föreskrivna programmet. Detta skall enligt kärnteknikförordningen (SFS 1984:14) 25 § redovisas under september månad vart tredje år.

Syftet med detta tredje program är att fullgöra ovanstående redovisningskrav.

Programmet redovisas i en huvudrapport och i tre underlagsrapporter. Programmet kallas FUD-program 92 där FUD står för Forskning, Utveckling och Demonstration. Skälet till namnförändringen jämfört med tidigare FoU-program är att betona att verksamhetens tyngdpunkt förskjuts mot att demonstrera olika delar av valt förvarssystem i och med arbetena vid Äspölaboratoriet och de planer som redovisas i detta program. Huvudrapporten beskriver programmet i sin helhet. Denna underlagsrapport ger en mer detaljerad redovisning av FoU-arbetena under perioden 1993–1998 utom för Äspölaboratoriet. Verksamheten där beskrivs i en särskild underlagsrapport. Dessutom behandlar en separat underlagsrapport Lokalisering av ett djupförvar.

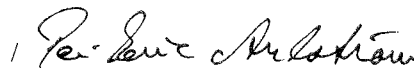
Stockholm i september 1992

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING AB



Sten Bjurström

VD



Per-Eric Ahlström

Forskningschef

# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	Sida
<b>1</b>	<b>INLEDANDE ÖVERSIKT</b> <b>9</b>
1.1	KRAV OCH MÅL 9
1.2	SITUATIONEN I DAG 9
1.3	ÖVERSIKTLIG PLAN FÖR FORTSATT ARBETE 11
1.4	LOKALISERING 15
1.5	PLANERAT SYSTEM FÖR INKAPSLING OCH DJUPFÖRVARING AV ANVÄNT BRÄNSLE 15
1.6	FUD-PROGRAMMETS UPPLÄGGNING 16
1.7	UNDERLAGSRAPPORTENS UPPLÄGGNING 17
<b>2</b>	<b>SÄKERHETSANALYSER</b> <b>19</b>
2.1	ALLMÄNT 19
2.2	MÅL 20
2.2.1	SKBs tidplan och behovet av säkerhetsanalyser 20
2.2.2	Mål för perioden 1993–1998 21
2.3	NUVARANDE KUNSKAPSLÄGE 22
2.3.1	Översikt 22
2.3.2	Scenarier 26
2.3.3	Modellering av transport i närområdet 26
2.3.4	Modellering av transport i fjärrområdet 29
2.3.5	Modellering av spridning i biosfären 29
2.4	PROGRAM 1993–1998 30
2.4.1	Funktions- och säkerhetsanalyser 30
2.4.2	Scenarier 30
2.4.3	Närzonen 31
2.4.4	Fjärrområde 32
2.4.5	Funktions- och säkerhetsanalyser 33
<b>3</b>	<b>ANVÄNT BRÄNSLE</b> <b>35</b>
3.1	NUVARANDE KUNSKAPSLÄGE 35
3.1.1	Korrosion av högaktivt bränsle 35
3.1.2	Andra komponenter i närområdet 41
3.1.3	Modeller 43
3.1.4	Naturliga analogier 44
3.2	MÅL FÖR PERIODEN 1993–1998 45
3.3	PROGRAM 1993–1998 45
3.3.1	Karakterisering av använt bränsle 46
3.3.2	Radiolys 46
3.3.3	Korrosion av högaktivt bränsle 47
3.3.4	Modellutveckling 47
3.3.5	Naturliga analogier 47
<b>4</b>	<b>KAPSEL</b> <b>49</b>
4.1	NUVARANDE KUNSKAPSLÄGE 49
4.1.1	Alternativa kapselmaterial 49
4.1.2	Korrosionsfrågor – koppar 50
4.1.3	Mekaniska aspekter 52
4.1.4	SKBs slutsatser 55
4.2	MÅL FÖR VERKSAMHETEN 55

	Sida	
4.3	PROGRAM 1993–1998	55
4.3.1	Korrosion	55
4.3.2	Alternativa utformningar – blyfyllning	56
4.3.3	Svetsning av koppar	56
4.3.4	Fyllnadsmaterial	56
4.3.5	Tillverkningskontroll – NDT	56
<b>5</b>	<b>BUFFERT OCH ÅTERFYLLNING</b>	<b>59</b>
5.1	BAKGRUND	59
5.2	MÅL FÖR FOU-VERKSAMHETEN 1993–1998	59
5.3	NUVARANDE KUNSKAPSLÄGE	59
5.4	PROGRAM 1993–1998	63
<b>6</b>	<b>GEOVETENSKAP</b>	<b>65</b>
6.1	INLEDNING	65
6.1.1	Bergets roll i djupförvaret	65
6.1.2	Principen för undersökningar i kristallint berg	66
6.1.3	Geovetenskapliga verksamhetens omfattning och samordning	67
6.1.4	Övergripande mål för det geovetenskapliga programmet	68
6.2	GRUNDVATTENRÖRELSER – KONCEPTUELL MODELLERING	68
6.2.1	Mål för verksamheten 1993–1998	68
6.2.2	Kunskapsläget	69
6.2.3	Program 1993–1998	70
6.3	BERGGRUNDENS STABILITET	72
6.3.1	Mål för verksamheten 1993–1998	72
6.3.2	Kunskapsläget	73
6.3.3	Program 1993–1998	78
6.4	GEOHYDROLOGISKA OCH BERGMEKANISKA BERÄKNINGSMODELLER	79
6.4.1	Mål för verksamheten 1993–1998	79
6.4.2	Kunskapsläget	79
6.4.4	Program 1993–1998	81
6.5	ALTERNATIVA SLUTFÖRVARSMETODER	82
<b>7</b>	<b>KEMI</b>	<b>83</b>
7.1	GRUNDVATTEN OCH GEOKEMI	83
7.1.1	Mål för verksamheten	83
7.1.2	Nuvarande kunskapsläge	83
7.1.3	Program 1993–1998	88
7.2	RADIONUKLIDKEMI	90
7.2.1	Mål för verksamheten	90
7.2.2	Nuvarande kunskapsläge – Resultat	91
7.2.3	Program 1993–1998	95
7.3	VALIDERING AV PROCESSER I TRANSPORT- MODELLER OCH RADIONUKLIDMIGRATION	97
7.3.1	Mål för verksamheten	97
7.3.2	Nuvarande kunskapsläge	97
7.3.3	Program 1993–1998	101

	Sida
7.4	ÖVRIGT 104
7.4.1	Sprickzonsprojektet 104
7.4.2	Kemisk toxicitet 104
<b>8</b>	<b>NATURLIGA ANALOGIER 105</b>
8.1	POÇOS DE CALDAS 105
8.1.1	Områdets geologi 106
8.1.2	Grundvattenkemi 111
8.1.3	Radionuklider och spårmetaller 112
8.1.4	Redoxfronten 112
8.1.5	Medfällning 113
8.1.6	Plutonium 114
8.1.7	Kolloider 114
8.1.8	Hydrotermal transport 115
8.2	CIGAR LAKE-PROJEKTET 116
8.3	OKLO-PROJEKTET 118
8.4	ÖVRIGT 119
<b>9</b>	<b>METODER OCH INSTRUMENT 121</b>
9.1	MÅL FÖR VERKSAMHETEN 121
9.2	NUVARANDE KUNSKAPSLÄGE 121
9.2.1	Mätmetoder och instrument för undersökningar från markytan 122
9.2.2	Mätmetoder och instrument för undersökningar i borrhål från markytan 122
9.2.3	Mätmetoder och instrument för undersökningar från tunnlar och schakt 126
9.3	PROGRAM 1993–1998 128
9.3.1	Mätmetoder och instrument för undersökningar från markytan och i borrhål från markytan 129
9.3.2	Mätmetoder och instrument för undersökningar från tunnlar och schakt 130
<b>10</b>	<b>BIOSFÄRSSTUDIER 133</b>
10.1	ALLMÄNT 133
10.2	MÅL 133
10.3	NUVARANDE KUNSKAPSLÄGE 134
10.3.1	Transport från grundvatten i berg till ett lokalt ekologiskt system via olika lokala mottagare såsom sediment, jord, vatten m m 134
10.3.2	Transport, utspädning, ackumulering och deponering i lokala, regionala och globala ekologiska system 135
10.3.3	Studier av Tjernobylnedfall 136
10.3.4	Transport till människor genom produktion och distribution av livsmedel 136
10.3.5	Upptag i människokroppen beroende på kostvanor och upptagsfraktioner 137

	Sida	
10.3.6	Beräkning av individdoser och kollektivdoser samt jämförelse med naturliga förhållanden	137
10.3.7	Platsspecifik studie av Äspöområdet	137
10.3.8	Matematisk och konceptuell modellering av spridning i biosfären	137
10.3.9	Övrig forskning inom biosfärsområdet	138
10.4	PROGRAM 1993–1998	138
10.4.1	Brunnar	138
10.4.2	Transport genom sediment och jord	138
10.4.3	Biosfärens förändringar	138
10.4.4	Naturliga analogier	138
10.4.5	Transportvägar i biosfären	139
10.4.6	Modeller och data	139
10.4.7	Platsspecifika studier	139
10.4.8	Acceptanskriterier	140
<b>11</b>	<b>TEKNIK FÖR DJUPFÖRVARING</b>	<b>141</b>
11.1	ALLMÄNT	141
11.2	MÅL FÖR VERKSAMHETEN 1993–1998	141
11.3	NUVARANDE KUNSKAPSLÄGE	141
11.3.1	Djupförvaringssystem	141
11.3.2	Prioriterad förvarsutformning	143
11.3.3	Teknik för tillredning och deponering	145
11.4	PROGRAM 1993–1998	148
<b>12</b>	<b>ÖVRIGT AVFALL</b>	<b>151</b>
12.1	BAKGRUND	151
12.2	AVFALLETS SAMMANSÄTTNING	151
12.2.1	Avfall från forskningsverksamhet i Studsvik	151
12.2.2	Härdkomponenter och interna delar	152
12.2.3	Avfall från inkapslingsstationen	152
12.3	SLUTFÖRVARING	152
12.4	MÅL FÖR VERKSAMHETEN 1993–1998	153
12.5	PROGRAM FÖR 1993–1998	154
	<b>REFERENSER</b>	<b>155</b>

# 1 INLEDANDE ÖVERSIKT

Detta kapitel är en förkortad version av den inledande översikten som ges i huvudrapportens kapitel 1. Kapitlet avslutas med ett avsnitt som beskriver hur denna underlagsrapport har lagts upp.

## 1.1 KRAV OCH MÅL

Målet för hanteringen av radioaktivt avfall är att på ett säkert sätt ta hand om alla radioaktiva restprodukter som uppkommer vid de svenska kärnkraftverken. Vidare skall man på ett säkert sätt ta hand om allt övrigt radioaktivt avfall som uppkommer i Sverige.

Kärntekniklagen kräver att ägarna till kärnkraftverken vidtager de åtgärder som behövs för att uppnå detta mål. Ägarna till de svenska kärnkraftverken har uppdragit åt Svensk Kärnbränslehantering AB att genomföra de åtgärder som behövs.

## 1.2 SITUATIONEN I DAG

Det svenska systemet för hantering av radioaktivt avfall, se Figur 1-1, beskrivs utförligt i den årliga redovisningen av kostnaderna för att ta hand om avfallet – PLAN 92 /1-1/. Väsentliga delar av avfallssystemet är redan i drift. Detta gäller det centrala mellanlagret för använt kärnbränsle, CLAB, slutförvaret för radioaktivt driftavfall, SFR, och transportsystemet. De delar som ännu ej beslutats är anläggningar för inkapsling av använt bränsle m m och slutförvaring av långlivat avfall, särskilt använt bränsle.

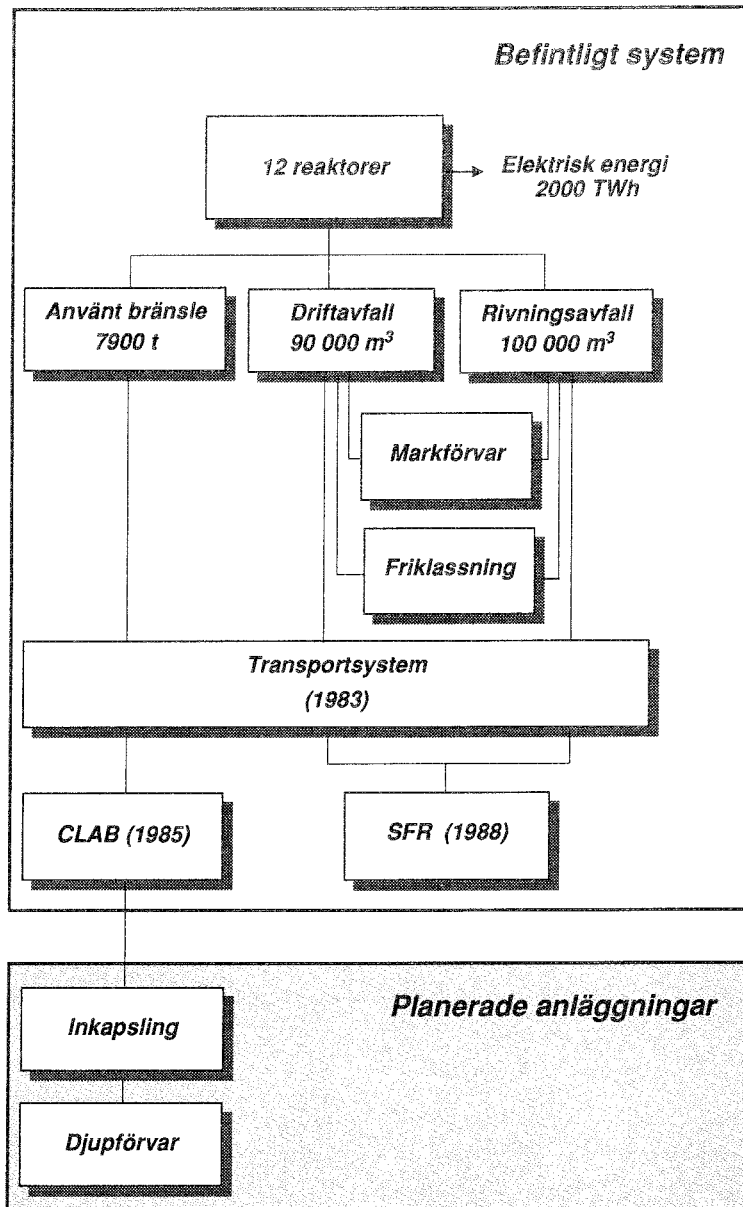
Det existerande systemet har utvecklats och byggts upp systematiskt på basis av förslag som lades i mitten av 1970-talet och den forskning och det utvecklingsarbete som inleddes med KBS-projekten under andra halvan av 1970-talet.

Förslag och alternativa möjligheter har därefter prövats och utretts av såväl myndigheter som kraftindustrin i omfattande FoU-arbeten under hela 1980-talet. Detta innebär att de viktiga frågorna för inkapsling och slutförvaring av använt kärnbränsle i svensk berggrund fått en ingående belysning.

Liknande arbete har genomförts och genomförs i flertalet länder med betydande kärnkraftutbyggnad. Pga de stränga krav som infördes i den sk villkorslagen 1977 kom arbetet i Sverige i gång med stor målmedvetenhet och goda resurser. Detta har givit den svenska verksamheten en internationellt erkänd ställning och lett till ett brett internationellt samarbete. Intresset i andra länder beror inte på att förutsättningarna för slutförvaring skulle vara bättre i Sverige utan på systematiken i det arbete som utförts och redovisats samt på kvaliteten hos de anläggningar som redan uppförts.

Det arbete som utförts under ca femton år i Sverige och motsvarande arbete i andra länder har lett till en bred enighet bland den internationella expertisen att det finns metoder för att genomföra slutförvaring av högaktivt avfall och använt kärnbränsle och att det också finns metoder att visa den långsiktiga säkerheten för sådan slutförvaring. Tydliga uttryck för denna enighet är t ex godkännandet av KBS-3-redovisningen /1-2/ i Sverige och av motsvarande studier i Finland /1-3/ och Schweiz /1-4/. Vidare bör nämnas de sk ”collective opinions” som uttalats av internationella expert-





Figur 1-1. Översikt av det svenska avfallshanteringssystemet.

grupper inom OECD/NEA, IAEA, och EG /1-5,6/. En viktig slutsats i den senaste av dessa "collective opinions" är att det fortsatta arbetet bör inriktas på bl a insamling och utvärdering av data från föreslagna slutförvarsplatser.

Efter att ha granskat säkerhet, teknisk genomförbarhet och andra aspekter för ett antal olika alternativ har arbetet i Sverige nu nått ett skede som förutsätter att arbetet koncentreras till en huvudlinje.

Principen för slutförvaring är att den skall ordnas så att avfallet hålls isolerat på ett säkert sätt under den tid som avfallet har högre radiotoxicitet än vad man eljest återfinner i naturen. Använt kärnbränsle innehåller stora mängder radioaktiva ämnen. De flesta av dessa har avklingat efter några hundra år. Efter tusen år återstår förutom uran och dess dotterprodukter ett fåtal långlivade ämnen bl a plutonium med mycket

lång avklingningstid. Efter drygt 100 000 år har bränslets radiotoxicitet minskat till i nivå med den man har i uranmalmer.

För att åstadkomma den önskade långsiktiga isoleringen utformas ett slutförvar för använt bränsle enligt multibarriärprincipen. Det använda bränslet består primärt av urandioxid, ett keramiskt material som är svårslösligt i grundvatten. De viktigaste långlivade radionukliderna, som bildats vid bestrålning i reaktorn t ex plutonium, är inbäddade i det keramiska materialet och likaså svårslösliga i vatten. Bränslet innesluts i en kapsel med god mekanisk beständighet och av ett material med lång korrosionslivslängd. Kapslarna placeras i speciellt tillredda utrymmen i berget och omges med ett buffertmaterial. Materialen i de tekniska barriärerna har dokumenterad långtidsstabilitet och förvaret påverkar endast i ringa grad de naturliga förhållandena i berget.

Säkerhetsanalyserna har visat att det finns utomordentligt goda förutsättningar för att utforma närområdet i förvaret så att de radioaktiva ämnena hålls isolerade för mer än en miljon år. Därutöver har berget en stark förmåga att sorbera de radionuklider som dominerar bränslets radiotoxicitet och utgör således en ytterligare barriär.

Säkerhetsanalysen SKB 91 /1-7/ som SKB genomfört under 1989-1992, visar att kraven på berggrundens egenskaper är begränsade. "...SKB 91 visar att ett förvar anlagt djupt ner i svenskt urberg och med långtidsstabila tekniska barriärer med god marginal uppfyller av myndigheterna föreslagna säkerhetskrav. Säkerheten hos ett sådant förvar är endast i ringa utsträckning beroende av det omgivande bergets förmåga att fördröja och sorbera radioaktiva ämnen. Bergets funktion är i första hand att under lång tid ge bestående mekaniska och kemiska förhållanden så att förutsättningarna för de tekniska barriärernas långtidsfunktion inte äventyras". De studier och undersökningar som gjorts av berggrunden i Sverige under den senaste 15-årsperioden visar att dessa egenskaper finns på många ställen och att det således finns många platser med geologiska och tekniska förutsättningar för att anlägga ett säkert slutförvar.

Kunskaperna är i dag tillräckliga för att välja en prioriterad systemutformning, för att utse kandidatplatser för förvarets lokalisering, för att karakterisera dessa och för att anpassa förvaret till lokala förhållanden.

### 1.3 ÖVERSIKTLIG PLAN FÖR FORTSATT ARBETE

SKBs tidigare plan för lokalisering och byggande av ett förvar för använt bränsle innebar att efter förundersökningar på tre platser och detaljundersökningar på två under 1990-talet så skulle man några år in på 2000-talet besluta om att bygga ett förvar för cirka 8 000 ton bränsle på en av platserna. I remissbehandlingen av FoU-program 89 /1-8/ diskuterades ett förslag från SKN om att man först borde bygga "...ett förvar i demonstrationsskala, exempelvis 5-10% av fullskaleförvaret". I sitt beslut om FoU-program 89 /1-9/ framhöll regeringen "...att en av utgångspunkterna för den fortsatta forsknings- och utvecklingsverksamheten bör vara att ett slutförvar för kärnavfall och använt kärnbränsle skall kunna tas i drift stegvis med kontrollstationer och möjligheter till justerande åtgärder. SKB bör i nästa FoU-program enligt kärntekniklagen utreda möjligheterna att låta ett slutförvar i demonstrationsskala ingå som ett led i arbetet med att utforma ett slutförvar".

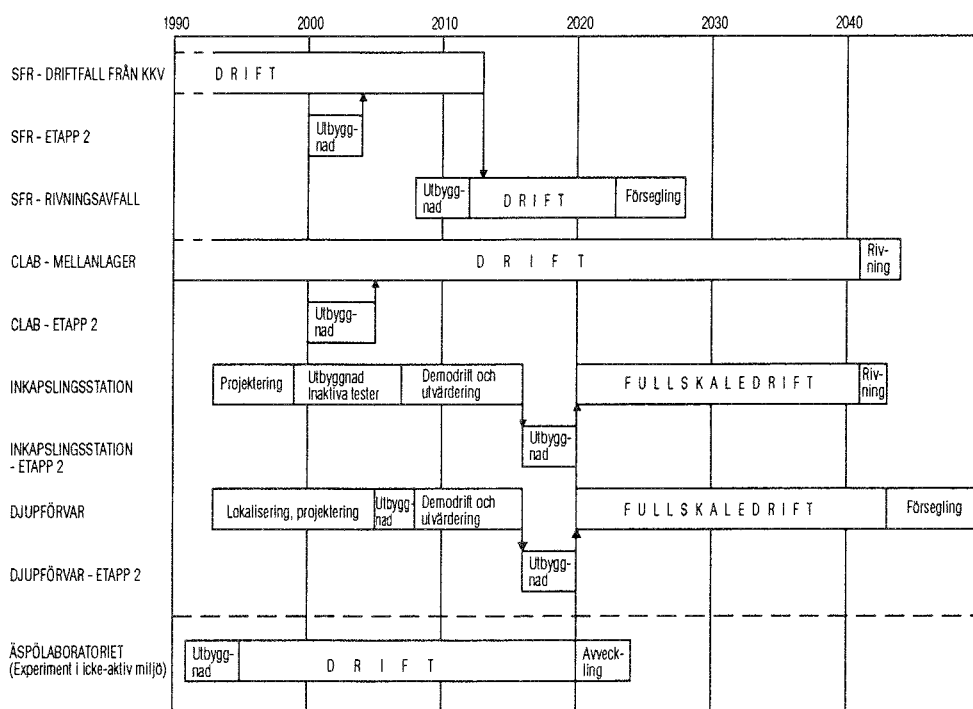
SKB har inför utformningen av 1992 års FUD-program övervägt dessa frågor om etappvis utbyggnad av förvaret. Resultatet är att SKB finner att en demonstrationsfas har betydande fördelar. Föreliggande program innebär därför att forsknings-, utvecklings- och demonstrationsarbetet fullföljs genom att, som ett första steg, bygga ett djupförvar för demonstrationsdeponering av använt kärnbränsle. När demonstrations-

deponeringen har genomförts skall erfarenheterna utvärderas innan man beslutar om man skall bygga ut anläggningen till att rymma allt avfall. Planen medger även att man kan överväga om det deponerade avfallet skall återtas för en alternativ hantering. Det senare betyder att det måste vara möjligt att återta deponerat bränsle under den tid anläggningen drivs för demonstration. Lokaliseringsprocessen påverkas endast i begränsad omfattning av om man planerar för ett djupförvar för demonstrationsdeponering eller för ett komplett djupförvar. Kraven på underlag från SKB i de olika skedena (förundersökning, detaljundersökning, bygge av förvaret) blir i allt väsentligt desamma.

Det viktigaste skälet till SKBs plan att bygga ett förvar för demonstrationsdeponering är att man då, utan att man behöver ta vad som ibland beskrivs och upplevs som definitiva beslut, kan demonstrera bland annat följande

- lokaliseringsprocessen med alla dess tekniska, administrativa och politiska beslut,
- processen och metoderna för stegvis undersökning och karakterisering av djupförvarsplatsen,
- systemutformning och byggande,
- inkapsling av använt bränsle i full skala,
- hanteringskedjan av använt bränsle från CLAB till deponering i förvar,
- driften av ett djupförvar,
- licensieringen av hantering, inkapsling och djupförvaring inklusive analysen av den långsiktiga säkerheten,
- (återtagbarhet av avfallskollin).

Härutöver kan man tänka sig att även studera barriärernas tillstånd en viss kortare eller längre tid efter deponeringen. Detta är dock något som i första hand kan och bör undersökas med icke radioaktivt material i Äspölaboratoriet, som är under byggnad vid Simpevarp ca 20 km norr om Oskarshamn.



Figur 1-2. Översiktlig tidplan – anläggningar för hantering av kärnkraftens restprodukter.

Man kan inte genom fältförsök demonstrera slutförvarets långsiktiga säkerhet. Tillåtligheten i detta avseende måste alltid baseras på en teknisk-vetenskaplig analys av förvarets funktion under lång tid. Det underlag som tas fram i samband med att djupförvaret för demonstrationsdeponering byggs innebär emellertid att man kan genomföra en säkerhetsanalys baserad på platspecifikt underlag i "full skala".

Anledningen till att SKB planerar en demonstrationsdeponering är inte tveksamhet om djupförvaringens genomförbarhet och säkerhet. Planen bör ses som ett uttryck för en insikt om och en respekt för att den lösning av kärnavfallsfrågan som FoU-arbetet resulterat i behöver förankras stegvis hos och konkret demonstreras för berörda kretsar i samhället långt utanför experternas krets. Det är SKBs uppfattning att en demonstrationsdeponering av använt kärnbränsle med bibehållen handlingsfrihet för framtiden är ett bra sätt att nå en bred uppslutning kring sättet att ta hand om kärnavfallet.

Den planerade demonstrationsdeponeringen innebär också att nuvarande generation beslutar för en tidrymd som motsvarar ungefär dess egen aktiva tid och lämnar öppet för efterföljande generation att ta ett eget beslut med ett så komplett beslutsunderlag som möjligt.

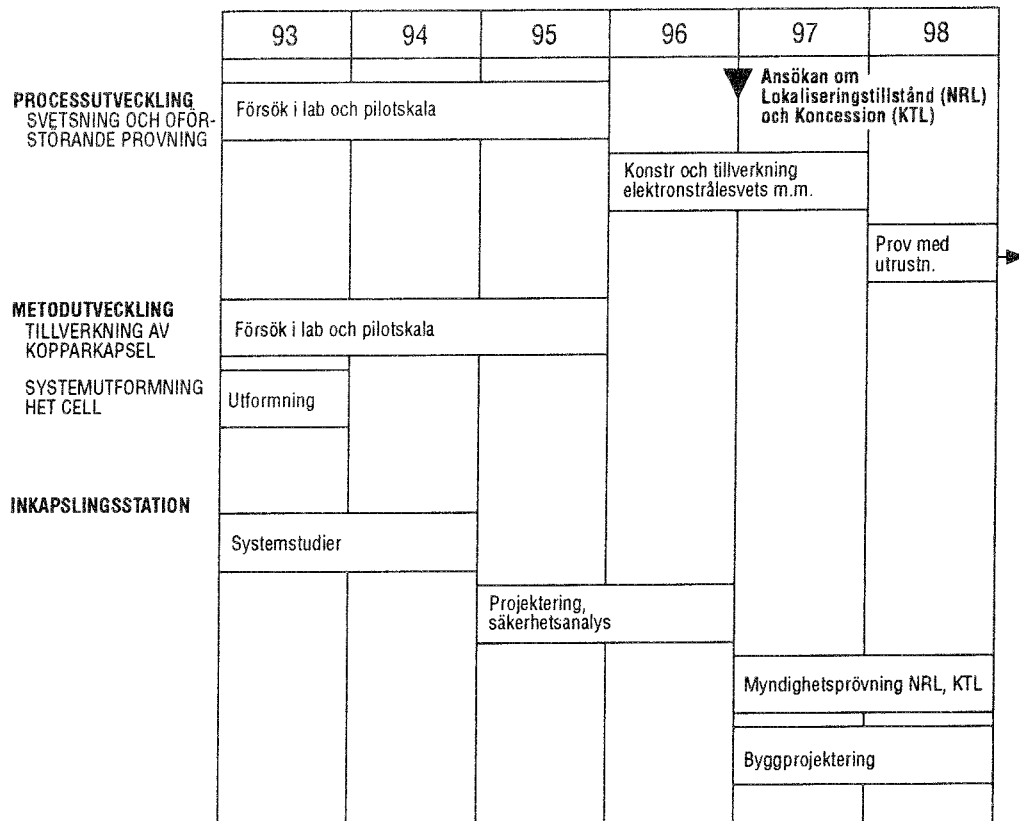
Arbetet fram till dess att allt kärnavfall i Sverige finns deponerat i ett slutet djupförvar planeras därför nu bli utfört i två huvudfaser: Demonstrationsdeponering respektive slutförvaring. Totalt sträcker sig arbetet över en period på mer än 60 år. Beslutet att ta steget till slutförvaring tas inte förrän efter genomförd demonstrationsdeponering, utvärdering av resultaten och övervägande av andra alternativ. Dessa beslut ligger i tiden efter år 2010. De planer som diskuteras i detta program handlar om den verksamhet som krävs för att lokalisera och uppföra de anläggningar som behövs för demonstrationsdeponering. Det är SKBs bedömning att man senare kommer att bygga ut djupförvaret i full skala. Det är dock inte meningsfullt att nu närmare diskutera detaljerna i hur man då kommer att gå tillväga.

Figur 1-2 visar en tidplan för de anläggningar som behövs för att ta hand om det långlivade radioaktiva avfallet. Följande ytterligare enheter kommer som framgår av Figur 1-2 att behövas för demonstrationsdeponering av använt kärnbränsle:

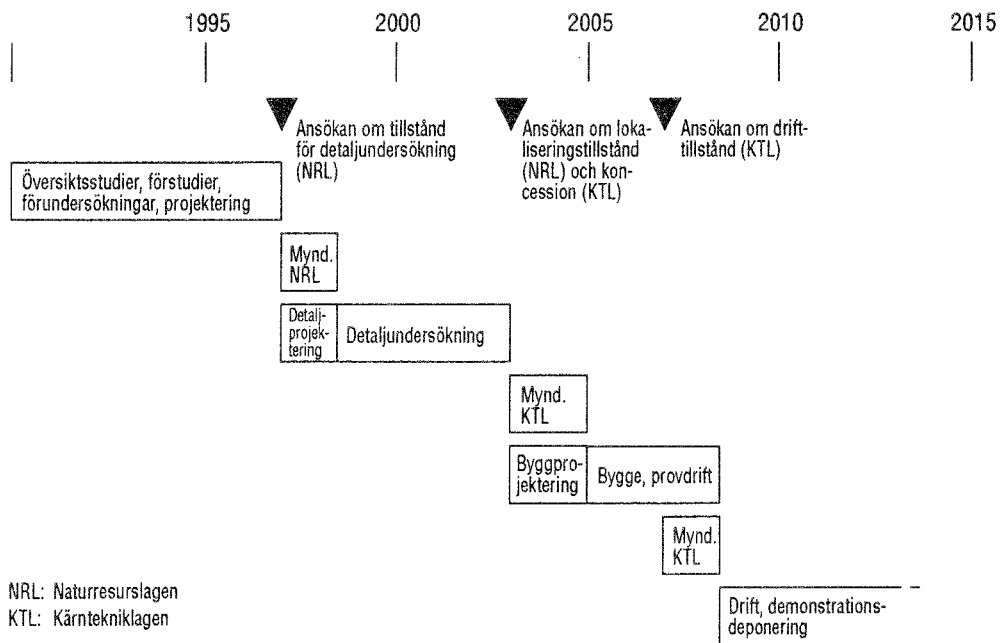
- Inkapslingsstation för använt bränsle, inklusive ett buffertlager för det inkapslade bränslet. Buffertlagret skall kunna utvidgas så att det kan användas som mellanlager om demonstrationsdeponeringen avbryts och kapslarna återtas.
- Djupförvar för inkapslat använt kärnbränsle.
- Transportsystem mellan CLAB och inkapslingsstation samt mellan denna och platsen för djupförvaret.

Figur 1-3 visar en tidplan för inkapslingsstationen och Figur 1-4 för djupförvaret fram till genomförd demonstrationsdeponering.

I princip kan man för den vidare planeringen bibehålla mellanlagringstiden 40 år även med den här förutsatta tidplanen för demonstration. SKB räknar med att demonstrationen kan genomföras inom ca 20 år. Det är således, som framgår av Figur 1-2, möjligt att fullfölja med slutförvaring av resterande bränsle och avfall strax efter 2020 om man så beslutar om ca 20 år.



**Figur 1-3.** Tidplan för inkapslingsstation 1993–1998.  
 NRL = Naturresurslagen  
 KTL = Kärntekniklagen



**Figur 1-4.** Exempel på tidplan för djupförvaret fram till genomförd demonstrationsdeponering. Planen beskriver tidigast tänkbara tidpunkter för genomförandet.

## 1.4 LOKALISERING

För inkapslingen av använt bränsle planerar SKB att bygga ut det centrala mellanlagret för använt bränsle (CLAB) vid Oskarshamnsverket. Det använda bränslet lagras redan nu vid CLAB och SKB bedömer att utbyggnad av CLAB med en inkapslingsstation har klara fördelar i fråga om logistik, resursutnyttjande och miljö. Om det under arbetet kommer fram speciella skäl för att inkapslingen bör ske vid djupförvaret, kommer SKB naturligtvis även att ta upp frågan om alternativ lokalisering av inkapslingsstationen.

Lokalisering och utbyggnad av ett djupförvar planeras ske stegvis under 1990-talet och några år in på 2000-talet. Enligt de bedömningar som nu kan göras av den tid som krävs för att ta beslut, genomföra nödvändiga utredningar och undersökningar och erhålla erforderliga tillstånd så skulle demonstrationsdeponeringen kunna påbörjas tidigast om ca 15 år.

Valet av kandidatorter för djupförvaret kommer att ske i enlighet med de grundläggande krav som måste ställas på en djupförvarsplats från säkerhetsmässig, teknisk, samhällelig och juridisk synpunkt. Man skall för vald plats och valt förvarssystem kunna visa att de av myndigheterna uppställda säkerhetskraven uppfylls. Man skall kunna bygga förvaret och tekniskt genomföra deponeringen på avsett sätt. Man skall genomföra lokaliseringen, undersökningarna och utbyggnaden så att alla relevanta, legala och planmässiga krav uppfylls. Sist, men inte minst, skall man kunna genomföra projektet i samverkan med kommunen och den berörda lokalbefolkningen.

En viktig utgångspunkt för planeringen av hur lokaliseringen skall gå till är regeringens beslut angående FoU-program 89 /1-9/. Där sägs följande: *"Regeringen konstaterar att SKBs val av platser för ett slutförvar kommer att granskas av olika myndigheter i anslutning till att SKB ansöker om tillstånd för detaljundersökning av två sådana platser enligt lagen (1987:12) om hushållning med naturresurser m m, miljöskyddslagen (1969:387) plan- och bygglagen (1987:383)."* Vidare underströk regeringen att SKB under lokaliseringsarbetets gång bör lämna information till berörda myndigheter, länsstyrelser och kommuner.

Utifrån dessa riktlinjer planeras arbetet med lokalisering och uppförande av djupförvaret ske i följande etapper, se Figur 1-4.

**Etapp 1** Översiktsstudier. Analys av lokaliseringsfaktorer. Eventuella förstudier av presumtiva kandidatorter. Val av kandidatorter. Förundersökningar på ett par platser, inklusive projektering. Tekniska och socioekonomiska utredningar. Utvärdering av resultaten. NRL-ansökan för detaljundersökning inkluderande miljökonsekvensbeskrivning (MKB) med en första säkerhetsanalys.

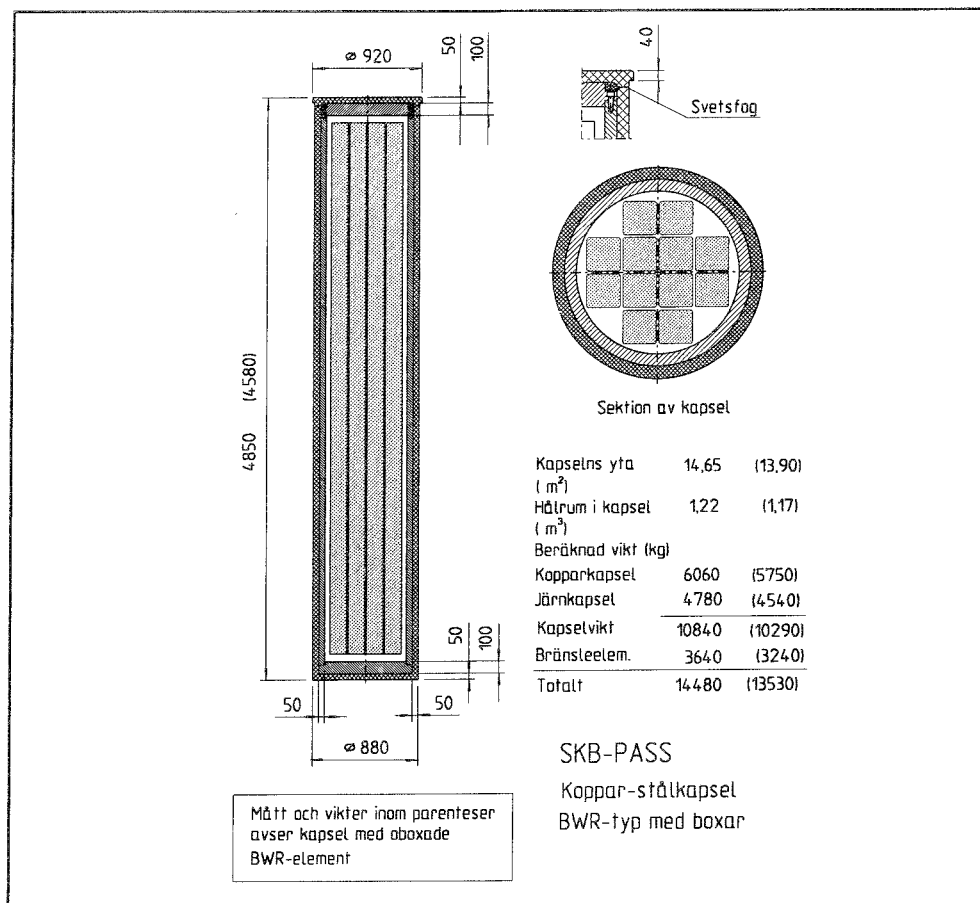
**Etapp 2** Detaljundersökning inklusive anläggning av nödvändiga schakt och tunnlar till planerat förvarsdjup. Utvärdering av resultaten. Säkerhetsrapport. Miljökonsekvensbeskrivning (MKB). Detaljprojektering. Ansökan om lokaliseringstillstånd och koncession (NRL, KTL).

**Etapp 3** Bygge och installation av utrustning för hantering/deponering. Slutlig säkerhetsrapport. Ansökan om drifttillstånd (KTL).

**Etapp 4** Driftsättning. Demonstrationsdeponering.

## 1.5 PLANERAT SYSTEM FÖR INKAPSLING OCH DJUPFÖRVARING AV ANVÄNT BRÄNSLE

Under perioden 1986 – 1992 har SKB studerat olika alternativa utföranden av ett djupförvar för slutdeponering av använt bränsle /1-10, 1-11, 1-12/.



Figur 1-5. Kompositkapsel enligt PASS.

Slutsatserna av genomförda studier är att det fortsatta arbetet för utformning av ett djupförvar för demonstrationsdeponering bör inriktas på ett alternativ. Härigenom uppnås den erforderliga koncentrationen och målinriktningen i utvecklings- och projekteringsarbetet.

Av de studerade kapselalternativen väljs den sk kompositkapseln rymmande 12 BWR-element som huvudalternativ i det fortsatta arbetet, se Figur 1-5. Denna kapsel består av en stålbehållare, som ger mekaniskt skydd, omgiven av en yttre kopparskåp, som ger långvarigt korrosionsskydd. Eftersom kapseln är en vital barriär bör viss vidareutveckling ske för alternativet blyfylld kopparkapsel som reservalternativ till kompositkapseln.

Av de studerade förvarsutformningarna bibehålls utformningen enligt KBS-3 som huvudalternativ för det fortsatta arbetet. Vid anpassning till de lokala förhållandena på vald plats kan denna utformning ytterligare optimeras varvid tekniskt närliggande varianter av utformningen kan ytterligare övervägas.

## 1.6 FUD-PROGRAMMETS UPPLÄGGNING

För att genomföra en demonstrationsdeponering av använt kärnbränsle i ett djupförvar krävs två huvudaktiviteter i utvecklingsarbetet – inkapsling respektive djupförvaring. Därtill behövs säkerhetsanalyser och stödjande forskning och utveckling.

Arbetet med inkapsling innebär slutligt val och utprovning av metod för tillverkning, förslutning och kvalitetskontroll av kapslar samt projektering, byggande, licensiering, montage, provdrift och drift av en anläggning för inkapsling. Arbetet med djupförvaring innebär lokalisering, projektering, byggande, licensiering, montage, provdrift och drift av anläggning och utrustning för demonstrationsdeponering i ett djupförvar.

De stödjande FoU-arbetena avser vidareutveckling av metoder, modeller och data inom områdena bränsle, geovetenskap, kemi, material och biosfär. De syftar till att

- vidareutveckla kunskapsbas och förmåga att modellera processer som är viktiga för förvarets funktion för att bättre kunna kvantifiera osäkerheter och säkerhetsmarginaler,
- följa upp den internationella utvecklingen på relevanta områden.

Insatserna planeras så att en kontinuitet erhålles i arbetet och att en uppdatering av kunskapsbas och analysmetoder görs i god tid före större utvärderingar av funktion eller säkerhet. Mycket av den stödjande FUD-verksamheten blir koncentrerad till Äspölaboratoriet. Ett viktigt stöd för vidareutveckling av säkerhetsanalysen är också fortsatta studier av bränsle och naturliga analogier.

Förutom arbeten som utgör direkt stöd för huvudlinjen – djupförvar för demonstrationsdeponering – planeras viss uppföljning av alternativa metoder och system för att ta hand om använt bränsle så att kunskaperna om dessa bibehålls och vidareutvecklas. Härigenom skapas underlag för att i en framtid även kunna värdera sådana system i jämförelse med det som demonstreras i Sverige. Vidare planeras arbeten avseende annat långlivat avfall samt för SFR och för rivning av kärnkraftverk.

En viktig del av FUD-programmet är det internationella samarbetet. Detta är omfattande och sker i flera olika former.

## 1.7 UNDERLAGSRAPPORTENS UPPLÄGGNING

Föreliggande underlagsrapport till FUD-Program 92 "Detaljerat FoU-program 1993–1988" ger en detaljerad beskrivning av utvecklingsläge och framtida insatser för säkerhetsanalyser och stödjande forskning. Här beskrivs också den teknikutveckling som erfordras för byggande av inkapslingsstationen och djupförvaret för demonstrationsdeponering. I texten ges referenser till specifikt underlag. Därutöver återfinns en lägesredovisning inom SKBs olika verksamhetsområden i 1991 års Annual Report /1-13/.

Kapitel 2 redovisar det behov av funktions och säkerhetsanalyser som föranleds av ovan redovisade planer för verksamheten. Metoder och modeller för analyserna diskuteras och programmet för den vidareutveckling under den närmaste 6-årsperioden som bedöms erforderlig redovisas.

Mot bakgrund av tidplanen för säkerhetsredovisningar mm redovisas utvecklingsläge, mål och periodens insatser för vidareutveckling rörande de tekniska barriärerna

- använt kärnbränsle i kapitel 3,
- kapselmaterial i kapitel 4 och
- buffert och återfyllningsmaterial i kapitel 5.

Utvecklingsläge, mål och insatser inom geovetenskap för

- grundvattenrörelser,
- berggrundens stabilitet och
- geohydrologiska och bergmekaniska beräkningsmodeller



redovisas i kapitel 6. Eftersom många försök och studier i fält koncentrerats till Äspölaboratoriet finns i detta kapitel ofta korsreferenser till en separat underlagsrapport om Äspö-programmet /1-14/.

Kapitel 7 redovisar förhållandena inom kemiprogrammet med separata avsnitt för

- grundvatten och geokemi,
- radionuklidkemi samt
- validering av modeller för transportmodeller och radionuklidmigration.

Även inom kemiprogrammet genomförs en stor del av fältverksamheten i Äspölaboratoriet.

Studiet av sådana naturliga förhållanden, som ur vissa synpunkter utgör analoger till viktiga kemiska sorptions och transportprocesser i ett djupförvar, redovisas i kapitel 8 – Naturliga Analogier. Utvecklingsläge och verksamheten för att ytterligare vidareutveckla fältinstrument och mätmetodik inom geologi, geohydrologi och grundvattenkemi redovisas i kapitel 9.

Kunskapsläget om radionuklidtransport i biosfären och modellering av denna samt resulterande doser till människa redovisas i kapitel 10. Därefter redovisas i kapitel 11 FoU-insatser knutna till den utveckling av teknik som erfordras för byggande, tillredning, deponering och eventuellt erforderlig återtagning av kapslar, samt återfyllning och förslutning av förvaret. Se även den särskilda underlagsrapporten för lokaliseringsprojektet /1-15/.

Rapporten avslutas med kapitel 12 som beskriver insatser för skötsel av övrigt avfall, dvs avfall från forskningsverksamheten i Studsvik, hårdkomponenter och interna delar samt avfall från drift och rivning av inkapslingsstationen.

Planerna inom området för rivning av kärntekniska anläggningar och omhändertagande av detta avfall har beskrivits i huvudrapportens kapitel 15. Då dessa insatser inte kommer att genomföras förrän efter 2010 behandlas de inte i denna rapport.

## 2 SÄKERHETSANALYSER

### 2.1 ALLMÄNT

Kärnteknisk verksamhet 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 kemiska eller fysikaliska växelverkan i sin miljö. Yttre och inre miljöförhållanden under vilka funktionen eller säkerheten skall utvärderas klarläggs i scenarioanalyser. Scenarioanalyser och funktionsanalyser utgör delar av den totala säkerhetsanalysen. Resultaten skall uttryckas i termer som överensstämmer med acceptanskriterier som fastställs av myndigheterna.

För radioaktivt avfall måste verksamhetens säkerhet visas både för ett aktivt hanteringskedje, den operativa säkerheten, omfattande t ex behandling, lagring, transport och deponering av avfallet, och för ett passivt förvarsskede efter det att slutförvaret har förslutits, den långsiktiga säkerheten.

Metoder och rutiner för säkerhetsanalys av system i aktiv drift har utvecklats, och vidareutvecklas fortlöpande, bl a inom kärnkraftindustrin. De har tidigare tillämpats vid licensiering av transportsystemet, CLAB och SFR.

Kopplingen mellan den operativa säkerheten och den långsiktiga säkerheten utgörs av kvaliteten hos de tekniska barriärerna och av sannolikhet för och omfattning av eventuell icke upptäckta brister vid tillverkningen.

Analys av den långsiktiga säkerheten har olika syften under olika faser av utvecklingen ett slutförvar. I ett inledande skede utvärderas förvarets delfunktioner för att skapa förståelse och för att ge underlag för konstruktionsstudier. 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 balanseras med avseende på funktion och kostnad på en acceptabel säkerhetsnivå. Analyserna är då ett verktyg för alternativjämförelser och för att pröva utformning eller utförande av förvar eller barriärer. För tillståndsgivningen skall det slutligen på ett formellt sätt visas att systemet uppfyller samhällets krav på säkerhet.

En integrerad säkerhetsanalys är ett viktigt verktyg för att klarlägga den sammanvägda säkerhetseffekten av olika barriärers funktion och för att utvärdera behovet av ytterligare insatser.

Analyserna av både den operativa och långsiktiga säkerheten är en del av underlaget för beslut och val inom SKB, för myndigheternas bedömning av framstegen i SKBs FoU-arbete och för myndigheternas beslut vid tillståndsgivning.

Som framgår av kapitel 1 befinner sig idag SKBs program i ett skede där de grundläggande studierna av genomförbarhet och säkerhet har avslutats. Granskningen av olika alternativ till förvaringen har resulterat i att arbetet i fortsättningen inriktas på en prioriterad utformning av kapslar och förvarsanläggning. Metoder för platskaraktisering och säkerhetsanalys har utvecklats så att de kan ge underlag till utvärdering av förlägningsplatsers säkerhet och till hur förvaret bör förläggas i berggrunden för att effektivt utnyttja platsens naturliga säkerhetsfunktion. Den nyligen genomförda säkerhetsanalysen SKB 91 /2-1/ har visat att de egenskaper som med hänsyn till långsiktig säkerhet måste föreligga i berget på en kandidatplats inte väsentligt avviker från de som normalt finns i urberget.

Nedan redovisas behovet av kommande säkerhets- och funktionsanalyser, och de frågeställningar som i olika skeden av den planerade utvecklingen behöver belysas. På basis av detta redovisas målen för verksamheten inom säkerhetsanalysens område för de närmaste 6 åren. Därefter görs en genomgång av utvecklingsläget för scenarier, för modellering uppdelat på närområde, fjärrområde och biosfär samt för acceptanskriterier. Kapitlet avslutas med en programredovisning uppdelad på motsvarande sätt.

## 2.2 MÅL

### 2.2.1 SKBs tidplan och behovet av säkerhetsanalyser

SKBs tidplan, se kapitel 1, innebär att lokalisering av ett djupförvar för demonstrationsförvaring påbörjas tidigast 1993. Målet är att kunna inge en ansökan om tillstånd för underjordiska detaljundersökningar ca 1997. Ansökan om lokaliseringstillstånd (NRL) och koncession (KTL) för djupförvaret görs omkring 2003 och ansökan om drifttillstånd för demonstrationsdeponeringen görs omkring 2007.

Parallellt med detta genomförs kompletterande utveckling samt projektering och anläggning av en inkapslingsstation för använt bränsle med kapaciteten att tillverka de kapslar som behövs för demonstrationsdeponeringen. Ansökan om lokaliseringstillstånd och koncession för denna anläggning planeras till omkring 1997.

De olika ansökningarna om tillstånd och koncession kommer att avse anläggningar med en storlek och kapacitet som motsvarar behoven för demonstrationsdeponering. I analysen av säkerheten kommer även säkerheten vid utbyggnad till full storlek och kapacitet att redovisas.

#### Förundersökningar av kandidatplatser

En förundersökning av en kandidatplats för djupförvaret syftar bl a till att fastställa förhållanden och egenskaper i berggrunden av vikt för byggbarhet, säkerhet, inplacering av förvaret och för planläggning av ev fortsatta detaljerade geologiska undersökningar.

Modellering av funktion och säkerhet under detta skede planeras ske stegvis i nära anslutning till platskaraktiseringen. Modellberäkningarna skall successivt ge underlag för att

- identifiera partier i berggrunden som har särskilt säkerhetsmässigt intresse, t ex dominerande flödesvägar för grundvattnet eller utströmningsområden, för vidare karakterisering,
- inplacera förvar och övriga anläggningsdelar på ett säkerhetsmässigt gynnsamt sätt i det studerade området,
- bedöma hur data som successivt kommer fram under förundersökningarna påverkar bilden av området,
- utvärdera betydelsen av osäkerheten i dataunderlag och tolkningar för säkerhet och byggbarhet,
- sammanställa en första preliminär säkerhetsbedömning av ett slutförvar på platsen.

I ett tidigt skede av platsstudierna förutses en översiktlig regional geohydrologisk modellering som underlag för en avgränsning av förundersökningsområdet. När sprickzonernas orientering har kartlagts och ett antal borrhål tagits upp i de mest intressanta bergblocken genomförs en modellering för att identifiera de huvudsakliga strömningsvägarna som underlag för förvarslayout och det fortsatta borrhprogrammet. Parallellt med undersökningarna genomförs ett antal modelleringar där tidigare dataunderlag successivt kompletteras/ersätts med platsspecifika data. Betydelsen av ev

olika tolkningar av zoners utsträckning etc. belyses. Mot slutet av perioden, dvs 1996, genomförs en integrerad säkerhetsanalys med aktuellt avfallsinventarium, närområde, lämpligt läge och utformning av förvaret samt aktuella biosfärsförhållanden på kandidatplatserna.

Förundersökningsprogrammet skall kunna anpassas till erhållna data och modellresultat. Bedömningar av hur känslig platsens funktion är för osäkerheter i underlaget kan ge anledning till kompletterande undersökningar.

Behovet av en successivt mera detaljerad geohydrologisk modellering från 1993 till 1995 och genomförda platsspecifika säkerhetsanalyser under 1996 ger tidsramar för den vidareutveckling av analysmodeller och analysmetoder som diskuteras i avsnitt 2.4 nedan.

### **Detaljerade platsundersökningar**

Tillstånd enligt NRL för detaljundersökningar förväntas föreligga omkring 1998. Vid dessa förutses berggrunden på förvarsdjup komma att karakteriseras till en detaljningsnivå som tillåter en betydligt mer detaljerad modellering av de geologiska förhållandena i kapslarnas närområden, samt av effekten av tunnelsystem och utbyggnad på bergets vattenföring. Detta i sin tur ger förutsättningar för en utvärdering av behovet av reservutrymmen för förvaret samt av behovet av pluggning i tillfarter, tunnlar och schakt, och av potentiella lägen för pluggarna.

Erforderlig vidare utveckling av underlag och metoder för att analysera dessa faktorer måste påbörjas under den kommande sexårsperioden för att kunna tillämpas i en ny integrerad säkerhetsanalys strax efter år 2000. Denna analys kommer att baseras på data dels från den detaljundersökta platsen, dels på utbyggnads och deponeringsförfaranden som definierats i samband med projekteringen av djupförvaret för demonstrationsdeponering.

### **Inkapslingsstationen**

Förstudier för en inkapslingsstation kommer att påbörjas 1993 och syftar till en ansökan om lokalisering och koncession 1997. Säkerhetsstudierna genomförs som en integrerad del av systemutformning och framtagning av konstruktionsunderlag. Säkerheten redovisas i form av en preliminär säkerhetsrapport omfattande inkapslingsprocessens operativa säkerhet och den kvalitet som tillverkning och kontroller kan uppnå. En slutlig säkerhetsrapport av inkapslingen skall föreligga vid ansökan om drifttillstånd för anläggningen, dvs ca 2007.

Inkapslingens kvalitet utgör också ett underlag för den preliminära bedömningen av närområdets funktion i säkerhetsanalyserna för kandidatplatserna.

## **2.2.2 Mål för perioden 1993 – 1998**

Målet för insatser inom området för funktions- och säkerhetsanalyser

- under förundersökningsskedet av kandidatplatser, dvs under perioden 1993–1996, är
  - att successivt genomföra analyser och utvärderingar av förhållanden av vikt för byggbarhet och platsens funktion som skyddsbarriär som underlag för fortsatt platskaraktärisering och inplacering av förvaret,
  - att under 1996 genomföra säkerhetsanalyser för platsanpassade slutförvarsanläggningar på två kandidatplatser, till en kvalitet som erfordras inför till-

ståndsansökan enligt NRL för de detaljerade geologiska platsundersökningarna,

- att under perioden successivt utvärdera behoven av ev ytterligare metodutveckling inför kommande funktions- och säkerhetsbedömningar enligt SKBs övergripande tidplaner, och att påbörja denna metodutveckling.
- vid projekteringen av inkapslingsstationen, och vid lokalisering och projektering av djupförvaret för demonstrationsdeponering, dvs fram till ca 1998, är
  - att i anslutning till systemstudierna genomföra en första säkerhetsgranskning av inkapslingsprocessen,
  - att fram till 1997 utvidga och komplettera denna till en detaljeringsnivå erforderlig för ansökan om koncession enligt KTL för inkapslingsstationen,
  - att till 1996, med anpassning till studierna för inkapslingsstation och förundersökningarna på kandidatplatserna, genomföra en säkerhetsanalys av transporter, hantering och deponering av det använda kärnbränslet och övrigt avfall (inkl ev erforderlig återtagning och efterföljande lagring).

Efter den närmaste 6-årsperioden skall säkerhetsrapporter för djupförvaret utgöra underlag för planerade ansökningar om lokalisering och koncession ca år 2003 och tillstånd för drift av inkapslingsstation och djupförvar ca 2008.

Projektering av förvaret för övrigt långlivat avfall kommer att påbörjas efter att demonstrationsdeponering inletts dvs först efter år 2010.

Funktions- och säkerhetsstudier på kandidatplatserna genomförs som integrerade delar av platskaraktiseringen. Motsvarande för inkapslingen genomförs som integrerade delar av systemutformning och projektering av inkapslingsstationen.

## 2.3 NUVARANDE KUNSKAPSLÄGE

### 2.3.1 Översikt

#### Allmänt

En säker hantering och förvaring av kärnavfallet syftar till att skydda människan och miljön från skadlig påverkan, både nu och i framtiden, och oavsett nationsgränser. Säkerhetsanalyser, liksom analyser av enskilda säkerhetsbarriärers långsiktiga funktion, skall klarlägga förvarets kapacitet att kvarhålla radionuklider till en sådan grad att samhällets säkerhetskrav är uppfyllda.

Metoder för genomförande av långsiktiga säkerhetsanalyser för radioaktivt avfall har utvecklats under närmare två decennier och tillämpats i ett flertal stora sammanfattande rapporter. Metodutvecklingen har anpassats till behoven i de nationella och internationella programmen för hantering av avfall från kärnenergiproduktionen.

Analysmetoderna har genom åren tillämpats, och vidare utvecklats, i ett antal större integrerade säkerhetsanalyser i Sverige och andra länder. Bland analyserna av slutlig förvaring av långlivat avfall från senare år kan nämnas, KBS-3 /2-2/, Project 90 /2-3/ och SKB 91 /2-1/ i Sverige och Projekt Gewähr /2-4/ i Schweiz för förvar i kristallin berggrund. Andra analyser genomfördes i PAGIS-projektet inom EG /2-5/ omfattande salt, lera, skiffer och granit, vid Waste Isolation Pilot Plant i USA för salt /2-6/ och vid Yucca Mountain av USDOE för tuff /2-7/. Dessutom har en internationell studie gjorts i OECD/NEAs regi av möjligheterna att slutförvara högaktivt radioaktivt avfall i djuphavssediment /2-8/. För närvarande pågår sammanställningen av säkerhetsut-

värderingen av den kanadensiska principutformningen för ett slutförvar för använt bränsle, samt uppdateringar av tidigare analyser för använt kärnbränsle i Finland och upparbetat avfall i Schweiz.

Analysen för låg och medelaktivt avfall i berg har gjorts och godkänts av myndigheterna för SFR i Sverige /2-9/ och för VLJ i Finland /2-10/. Säkerhetsanalyserna för Konradgruvan i Tyskland är under granskning. Därutöver har ett flertal studier i olika länder gjorts för markdeponering av radioaktivt avfall.

Nedan ges en översikt av området för funktions- och säkerhetsanalyser i stort med speciell belysning av vissa väsentliga områden. Behov av modellspecifik vidareutveckling diskuteras i avsnitt 2.3.2 och framåt.

### **Collective opinion**

Under 1990 granskade OECD Nuclear Energy Agency tillgängliga metoderna för att utvärdera säkerheten hos system för slutförvaring av radioaktivt avfall och erfarenheten från att använda sådana metoder på skilda förvarsprinciper och i skilda geologiska miljöer /2-11/. Ett gemensamt uttalande gjordes av OECD/NEAs "Radioactive Waste Management Committee" och IAEAs "International Radioactive Waste Management Advisory Committee" /2-12/.

Man konstaterade inledningsvis att korrekt och tillräcklig förståelse av föreslagna förvarssystem är förutsättningen för att meningsfulla analyser skall kunna genomföras, och noterade att en huvuduppgift för framtiden är att få fram och analysera platsspecifika data från föreslagna förvaringsplatser. Man konstaterade vidare att signifikanta framsteg gjorts i vår förmåga att genomföra säkerhetsanalyser, att kvantifierade bedömningar alltid kommer att innehålla element av kvalitativa bedömningar, och att en vidareutveckling av analysmetoderna kan och kommer att ske som följd av pågående forskning.

Med detta i åtanke bekräftade de två kommittéerna att

- säkerhetsanalysmetoder finns idag tillgängliga för att utvärdera potentiell radiologisk långtidspåverkan på människor och miljö från ett omsorgsfullt konstruerat förvarssystem för radioaktivt avfall, och att
- en lämplig användning av säkerhetsanalysmetoderna kan, tillsammans med tillräcklig information från en föreslagen lokaliseringsplats, ge ett tekniskt underlag för bedömningen om förvarssystemet erbjuder en, för nuvarande och framtida generationer, tillräcklig säkerhet.

Detta gemensamma uttalande stöddes också av EGs "Experts for the Community Plan of Action in the Field of Radioactive Waste Management".

### **SKB 91**

Under 1992 redovisade SKB en säkerhetsanalys, SKB 91 /2-1/, som syftade dels till att klarlägga den säkerhetsmässiga betydelsen av förlägningsplatsens berggrund, dels till att etablera en praktisk metodologi för den säkerhetsmässiga utvärderingen av kandidatplatser. Materialet utgör till stor del en redovisning av dagens kunskapsläge.

Metodologiska nyheter i denna analys, jämfört med tidigare svenska analyser, är möjligheten att systematiskt utnyttja både generiska och platsspecifika data, möjligheten att ta hänsyn till förvarets utbredning i rummet och att modelleringen av grundvattnets strömning i berggrunden görs med hänsyn till den osäkerhet som den naturliga variabiliteten i bergets egenskaper medför.

Säkerhetsanalysen SKB 91 visar, att ett förvar anlagt djupt ner i urberg och med långtidsstabla tekniska barriärer med god marginal uppfyller av myndigheterna fö-

reslagna säkerhetskrav. Säkerheten hos ett sådant förvar är endast i ringa utsträckning beroende av det omgivande bergets förmåga att fördröja och sorbera utläckande radioaktiva ämnen. Bergets funktion är i första hand att under lång tid ge stabila mekaniska och kemiska förhållanden så att de tekniska barriärernas långtidsfunktion inte äventyras.

SKB 91 har visat, att de säkerhetsmässiga krav som måste ställas på en plats där ett slutförvar skall byggas är sådana att de torde vara uppfyllda på de flesta platser som SKB undersökt i Sverige. Analyserna visar också att det finns ett antal faktorer som kan vara starkt styrande för hur berggrunden fungerar som extra säkerhetsbarriär. Exempel på sådana är förekomst och läge av flacka strukturer och deras vattenföring.

SKB 91 utgör ett exempel på hur funktions- och säkerhetsanalyser kan användas för att belysa betydelsen av olika geologiska strukturer i ett tilltänkt förvarsområde och för att klargöra faktorer som är väsentliga ur säkerhetssynpunkt. Metodiken kan, i ett fortsatt lokaliseringsarbete, utnyttjas för att anpassa förvaret på ett sådant sätt att bergets förmåga att bidra till förvarets säkerhet utnyttjas på bästa sätt. Detta fordrar dock tillgång till platsspecifika data och möjlighet att successivt komplettera dessa data parallellt med fortlöpande säkerhetsanalyser.

### **Osäkerheter**

Analyser av säkerheten hos ett slutförvar för använt bränsle har uppnått en hög grad av förfining, realism och detaljrikedom i beskrivningen av processerna och i modelleringen. Trots detta är analyserna fortfarande behäftade med osäkerheter av kvalitativ, konceptuell art såväl som av kvantitativ, numerisk art. Internationellt försöker man att kategorisera osäkerheterna i scenarionsosäkerheter, osäkerheter i de konceptuella modellerna, parameterosäkerheter etc., för att underlätta deras behandling. Gränserna mellan kategorierna är dock flytande. All osäkerhet bottnar i de kunskapsbrister som trots allt fortfarande finns.

I SKB 91 redovisar SKB flera sätt att behandla osäkerheter med kvantitativ osäkerhetsanalys. En viktig faktor bedömdes vara den osäkerhet i den storskaliga hydrologin som ges av den hydrauliska konduktivitetens rumsliga variabilitet i kombination med det faktum att konduktiviteten är uppmätt endast i ett begränsat antal punkter. Variabiliteten är så betydande att användning av medelvärden inte kan anses vara berättigad. I SKB 91 användes en stokastisk kontinuummodell för grundvattenflödet för att kvantifiera dessa osäkerheter. Även inplaceringen av den andel kapslar som antagits vara initialt defekta har behandlats probabilistiskt för att kvantifiera den därav uppkomna osäkerheten.

Betydelsen av osäkerheter relaterade till platsens egenskaper och geologiskt baserade bedömningar av strukturers lägen och egenskaper behandlades i SKB 91 med en omfattande känslighetsanalys inom ramen för de variationer av platsens egenskaper som studerades. Redoxförhållanden i närzonen, osäkerheter i transportparametrar, osäkerheter i framtida hydrologiska förhållanden i samband med glaciation och permafrost, osäkerheter i salinitetsförhållanden etc. studerades med hjälp av känslighetsanalyser.

### **Kvalitetssäkring**

I samband med SKB 91 provades ett formellt system för organiserande av data och modeller som användes i analysen. Tonvikten lades därvid på dokumentation av indata och på spårbarheten. Provet gav värdefulla erfarenheter inför kommande analyser.

### **Acceptanskriterier**

SKI och SSI har sedan slutet av 80-talet, tillsammans med andra nordiska kärnsäkerhetsmyndigheter, arbetat med att ta fram ett gemensamt dokument rörande principer och acceptanskriterier för den långsiktiga slutförvaringen av högaktivt radioaktivt avfall. Dokumentet är avsett att utgöra en rekommendation som kan ligga till grund för nationella föreskrifter. SKB har fått möjlighet att ta del av arbetet och lämna synpunkter.

I SKB 91 har dessa nordiska tankegångar utnyttjats för att anknyta analysernas resultat till acceptanskriterier. SKB förutsätter att detta arbete fortsätter så att säkerhetskraven har fastslagits innan lokaliseringsarbetet kommer in i ett formaliserat licensieringsskede.

### **Den operativa säkerheten**

För radioaktivt avfall måste verksamhetens säkerhet visas både för ett aktivt hanteringskede, operativ säkerhet, omfattande t ex behandling, lagring, transport och deponering av avfallet, och för ett passivt förvarsskede efter det att slutförvaret har blivit förslutet, långsiktig säkerhet.

De metoder och rutiner för säkerhetsanalys av system i aktiv drift som utvecklats, inom kärnkraftindustrin är väl utvecklade och testade. De har tidigare tillämpats vid licensiering av kärnkraftstationer, transportsystemet, CLAB och SFR och bedöms tillräckliga för den redovisning som krävs för tillståndsprovning av den hantering av radioaktivt avfall som erfordras enligt planerad systemutformning.

Ett tekniskt erfarenhetsunderlag för huvuddelen av den hantering och de åtgärder som vidtas i inkapslingsstationen, vid transporten och vid demonstrationsdeponeringen i djupförvaret föreligger från redan säkerhetsgranskade kärntekniska anläggningar. Ett antal operationer är dock oprövade och utvecklingsinsatser har planerats som stöd för design och projektering av dessa. Insatserna berör:

- Elektronstrålesvetsning av kapselns kopparhölje.
- Val av material för ev efterfyllning av kapseln.
- Tillverkningskontroll och icke förstörande provning.
- Tillredning av deponeringspositioner, inplacering av kapslar samt kontroll av utförandet.
- Återfyllning av tunnlar.

Analysen av den operativa säkerheten i djupförvaret skall även omfatta den hantering som erfordras för ett eventuellt återtagande och mellanlagring av det avfall som deponeras under demonstrationsfasen.

Vissa utvecklingsinsatser för alternativa hanteringsmetoder kommer att bedrivas parallellt med projekteringen av den prioriterade systemutformningen. Inriktning och omfattning av dessa arbeten beskrivs i anslutning till respektive ämnesområde i denna underlagsrapport.

Kopplingen mellan den operativa säkerheten och den långsiktiga säkerheten utgörs av erhållen kvalitet för de tekniska barriärerna eller sannolikhet och omfattning av eventuellt icke upptäckta brister vid tillverkningen.

### **Övrigt långlivat avfall**

En del avfallsformer avses inte bli deponerade i förvaret för använt kärnbränsle. Exempel är vissa delar av reaktorhärden som bränsleboxar, styrcylindrar, startneutronkällor etc. Andra avfallstyper kan tillkomma från industrin och sjukhusen.



Säkerhetsanalyser för den slutliga förvaringen av dessa avfall och anläggningar kan till viss del baseras på modeller och metodik som utvecklats för förvaret för använt bränsle eller SFR. Beroende på avfallstyp och konditionering kan dock ytterligare utveckling komma att behövas, speciellt vad gäller scenarier och modeller för kemisk speciering och nuklidtransport.

En systematisk granskning av olika avfallsformer och hur de skall fördelas mellan olika förvar kommer att genomföras under kommande 3-årsperiod.

### 2.3.2 Scenarier

För att kunna bedöma hur framtida förändringar av ett förvarssystemets yttre och inre miljö kommer att påverka säkerheten måste en genomgång och prioritering av alla relevanta kombinationer av möjliga förändringar genomföras. Eftersom antalet processer och händelser som i framtiden skulle kunna påverka ett förvar är mycket stort måste en systematik utvecklas för att ge möjlighet till överblick och prioritering.

Under 1988 startade ett gemensamt projekt mellan SKI och SKB för att bedöma möjligheterna att systematiskt bearbeta information om förvarssystemets grundläggande egenskaper, framtida "plötsliga" händelser samt i systemet pågående processer (Features, Events och Processes, FEP's), samt att från denna information få fram och prioritera relevanta scenarier /2-13/. Projektet, som för vissa moment även använde utländsk expertis, gav som resultat att en databas skapades för ett antal FEP's (ca 150 st). Processen att skapa relevanta scenarier i projektets slutskede visade sig vara beroende av ett betydande mått av sk "expert judgement".

En viktig fråga vid scenarioanalys för ett slutförvar är hur det skall kunna visas att inga för varets säkerhet väsentliga fenomen eller miljöförutsättningar har blivit förbisedda. För att erhålla bästa möjliga fullständighet vid analysen måste en kontinuerlig uppdatering genomföras av underlagsmaterialet till scenariobedömningen. Bred internationell samverkan inom området scenarioanalys kommer att vara av stort värde för att fånga upp nya synsätt och tankegångar samt för att få koncensus på föreslagna scenarier samt den metodik som använts vid framtagningen av dessa.

I SKB 91 har ett antal scenarier behandlats:

- Betydelsen för säkerheten av ändrade data för olika platsspecifika geologiska förhållanden (Features) har granskats.
- En generell beskrivning av ett glaciationsscenario har sammanställts tillsammans med TVO i Finland /2-14/ och dess betydelse för grundvattenflöden och differentiella berg rörelser har diskuterats.
- Betydelsen av kolloider och komplexbildare för transport med grundvattnet har avgränsats.
- Betydelsen för djupförvarets säkerhet av olika antaganden om framtida försurning har granskats.

Förslag finns inom OECD/NEA att en internationell databas för FEP's skall upprättas. SKB avser att medverka och stödja en sådan utveckling under programperioden.

### 2.3.3 Modellering av transport i närområdet

Kunskapsläget inom närzonsmodelleringen framgår av de säkerhets och funktionsanalyser som redovisats i SKB 91 och PASS /2-1, 2-15/. Nedan ges en sammanfattning.

Beräkningarna av nuklidtransport i närzonen i SKB 91 gjordes i huvudsak med den integrerade närzonskoden Tullgarn /2-16/. Tullgarn är en vidareutveckling av PRO-PER-undermodellen NEAR21 /2-17/. De processer som modellen tar hänsyn till är:

- Radioaktivt kedjesönderfall.
- Tre kapselgenombrottsmekanismer
  - initial skada,
  - uppbyggnad av inre heliumtryck,
  - korrosion.
- Bränsleupplösning. Matrisupplösningen beräknas enligt den modell för bränslekorrosion som redovisas i avsnitt 3.2.3 med ett effektivt G-värde uttryckt som antalet omvandlade molekyler  $UO_2$  per 100 eV räknat på hela  $\alpha$ -aktiviteten.
- Transportberäkningarna görs med en kopplad resistornätverksmodell /2-18/, där transportmotstånden i närområdet beskrivs som kopplade resistorer, se Figur 2-1.

Tullgarn beräknar den stationära uttransporten av radionuklider från bränsleytan genom ett hål i kapseln där R3 är transportmotståndet orsakat av hålets begränsade area och R2 är diffusionsmotståndet i hålet, via diffusion genom bufferten (R4) till spricka i berget (R6) eller axiell diffusion (R7) till den störda zonen (R8). Koderna kan också beräkna diffusion genom bergmatrisen om sprickan skulle vara tätad med bentonit (R5). Utläckaget av gap- och korngränsinventariet modelleras olika beroende på typ av kapselskada. Om kapseln har en initial skada löses gap- och korngränsinventariet i kapselns voidvolym och släpps sedan ut med det beräknade  $Q_{ekv}$ . I fallen när kapsels transportmotstånd försummas (korrosions- eller övertrycksskada) löses inventariet i buffertens volym och släpps sedan ut med  $Q_{ekv}$  (i detta fall försummas transportmotståndet i hålet). Transportmotståndet inuti kapseln försummas för närvarande helt.

Tullgarn tar inte hänsyn till den transienta fasen av utdiffusionen av radionuklider efter kapselgenombrott, vilket kan ge pessimistiska resultat för vissa nuklider. För att belysa betydelsen av den transienta diffusionen gjordes i SKB 91 en förenklad närområdesberäkning med TRUCHN, en integrerad finita differens kod utvecklad från värmetransportkoden TRUMP /2-19/. Resultaten /2-20/ visar att den transienta perioden är mycket viktig för de nuklider som sorberar starkt i bentoniten (t ex aktiniderna).

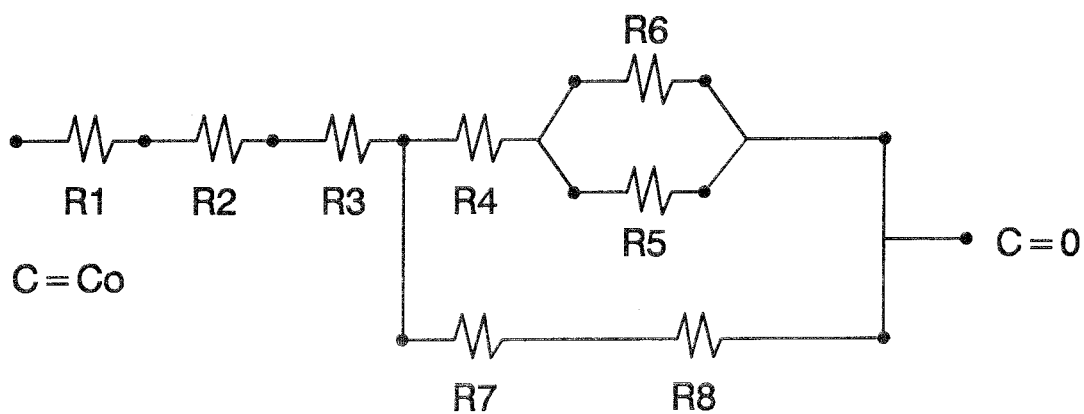
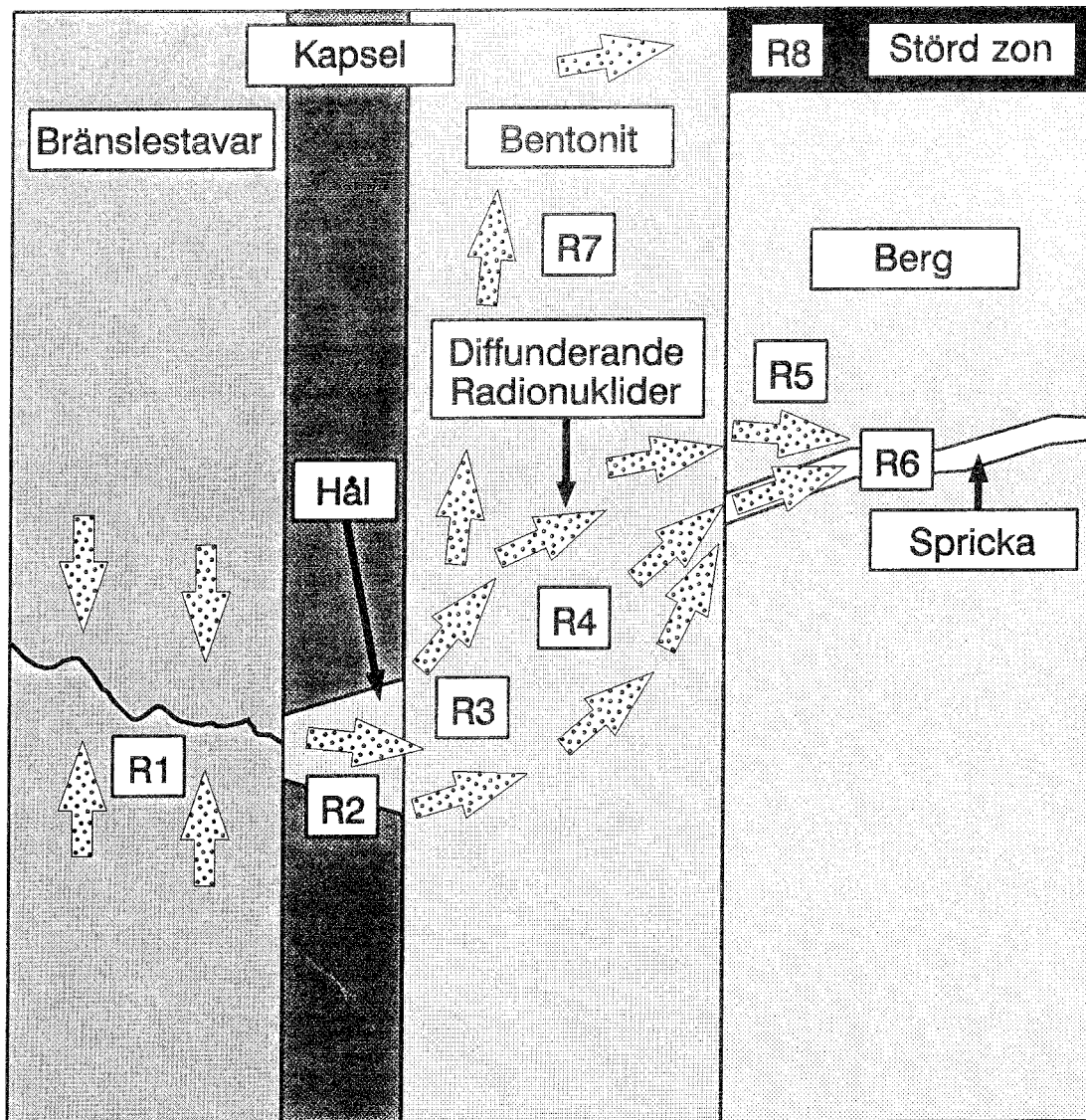
För att ta hänsyn till den transienta diffusionen pågår utveckling av en skompartimentmodell /2-21/, vilken delar in närområdets komplexa geometri i ett antal reservoarer. En reservoar karakteriseras av sin volym (kapacitet) och ett antal överföringsflöden till och från andra reservoarer. Modellen har testats med Pu-239 som exempel. Arbete med verifiering av koden pågår för närvarande. Planerna är att använda kompartimentmodellen som ett komplement till Tullgarn.

Utveckling av ett datorprogram som kan modellera kopplad geokemi/transport och hantera skarpa reaktionsfronter pågår /2-22/. Modellen har testats på redoxfronten i Poços de Caldas. Utvecklingsarbetet beräknas vara klart under 1992.

### **Geokemisk modellering**

Det geokemiska datorprogram som är mest generellt är EQ3/6-paketet, konstruerat av Wolery /2-23/. Detta program är färdigt för att användas och finns implementerat på SKB-datorer. Det har använts med framgång vid ett flertal tillfällen för att simulera såväl fält- som laboratorieförsök. EQ3/6 har också använts för att göra radionuklidlöslighetsberäkningarna i SKB 91 /2-24/.

För att stärka tilltron till den geokemiska modelleringen har validering av utvalda viktiga delar i den geokemiska databasen pågått under ett flertal år. Resultatet har blivit



**Figur 2-1.** Resistornätverksmodell för transportmotståndet i närzonen. I beräkningarna för den initialt defekta kapseln har R1, R2 och R5 försumrats. I övriga fall har även R3 försumrats.

validerade databaser för uran /2-25/, plutonium /2-26/ och teknetium (rapporten för den senare är ännu ej publicerad).

### 2.3.4 Modellering av transport i fjärrområdet

En genomgång av kunskapsläget för grundvattenmodellering ges i avsnitt 6.2. Många aspekter av radionuklidtransport i sprickigt berg berörs också i kemiavsnittet, kapitel 7. Kemidata presenteras i avsnitt 7.2 och processer i avsnitt 7.3. Det är säkerhetsanalysens uppgift att knyta samman modellerna för olika väsentliga processer till beräkningsmodeller för transport i fjärrområdet. Dessa ska vara tillräckligt detaljerade för att ta hänsyn till alla viktiga fenomen vilka styr skeendet i fjärrområdet men samtidigt tillräckligt förenklade för att totala systemanalyser för slutförvaret ska kunna genomföras.

En utförlig redovisning av de flesta beräkningsmodeller som SKB använder för grundvattenrörelser och radionuklidtransport ges i kapitel 8 av SKB 91-rapporten /2-1/. Där diskuteras olika begreppsmodeller och strategi vid modellering av transport i fjärrområdet. I följande avsnitt ges därför endast en kortare sammanfattning av använda modeller tillsammans med viss kompletterande information om de modellansatser som ej utnyttjats i SKB 91.

Ett av kraven på den beräkningsmodell som skulle användas i SKB 91 var att hänsyn skulle kunna tas till den rumsliga variabiliteten i bergets hydrauliska egenskaper. Modellering gjordes bl a därför med en stokastisk kontinuummodell, HYDRASTAR /2-27/. Med Monte Carlo-teknik genererades realiseringar av konduktivitets- och potentialfälten betingade på uppmätta borrhålsdata. En deterministisk kontinuummodell, NAMMU, användes dessutom för storskalig modellering av grundvattnets rörelser och för generering av randvillkor till HYDRASTAR /2-28/.

Vidare användes beräkningsprogrammet PHOENICS för modellering av det kopplade problemet med saltransport och grundvattenflöde /2-29/. PHOENICS har även använts för ett flertal analyser inom Äspö-projektet.

Det bedömdes inte i SKB 91 som möjligt att använda en "diskret sprick"-modell för simuleringar av grundvattenflödet i ett block av storleksordningen 25 km<sup>3</sup> betingade på de lokala sprickmönstren runt varje mätsektion. Metoden som sådan och dess tillämpning har diskuterats i avsnitt 6.4.2. För den modellering som gjorts har FRACMAN/MAFIC /2-30, 2-31/ använts.

Observationer i berg av vattenflödets kanalisering och snabba transportvägar har även lett till utveckling av speciella kanalströmningsmodeller för förenklad beräkning av nuklidtransport, t ex vid säkerhetsanalysen för SFR.

Blandning mellan kanaler kan förutses för storskaliga beräkningar och för detta ändamål har även en stokastisk modell bestående av ett nätverk av kanaler utvecklats /2-32/. Det är alltså de vattenförande kanalerna och ej bergets sprickor som utgör grunden för modellen.

### 2.3.5 Modellering av spridning i biosfären

Spridning i biosfären beror av ett stort antal processer och föränderliga basdata. Modelleringen behandlas därför med mycket generella s k kompartmentmodeller, kopplade till multiplikativa modeller för upptag i biota och dosberäkning /2-33/.

SKB har nästan uteslutande använt programkoden BIOPATH i kombination med programsystemet PRISM för osäkerhetsanalys. Dessa koder har jämförts med andra i

de internationella studierna BIOMOVS /2-34/, VAMP /2-35/ och PSAC /2-36/ och befunnits vara tillförlitliga.

En riktigt verklighetstrogen biosfärmodell är svår att åstadkomma. De konceptuella modeller som använts dras med både osäkerhet och variation i indata /2-37/. Strukturen varierar med tiden och kan dessutom vara svår att förutsäga. I SKB 91 har ett antal schematiska biosfärer definierats /2-1, 2-38/. För ett centralt fall har de osäkerheter i resulterande dosomvandlingsfaktorer som beror på variabiliteten i indata redovisats.

## **2.4 PROGRAM 1993–1998**

### **2.4.1 Funktions- och säkerhetsanalyser**

Enligt målbeskrivningen kommer ett antal funktions och säkerhetsanalyser att behöva genomföras i anslutning till planerade förundersökningar och anläggningsprojektering.

I säkerhetsanalysen SKB 91 kopplades modeller för källterm, barriärfunktioner, grundvattentransport, nuklidspridning och dos ihop till en total säkerhetsanalys. Erfarenheterna från genomförandet av denna analys, samt kvalitetskontrollen knuten till analysen är under utvärdering och kommer att ligga till grund för ev vidareutveckling av tillämpade rutiner och metoder. Denna vidareutveckling skall genomföras med hänsyn till behovet av den framtida modelleringen av funktion och säkerhet vid karakterisering av kandidatplatser.

De insatser som planeras för vidareutveckling av metoder och modeller redovisas under rubrikerna

- scenarier,
- närzon,
- fjärrzon och
- funktions- och säkerhetsanalyser.

Insatser för utveckling inom biosfären redovisas i kapitel 10.

### **2.4.2 Scenarier**

Under perioden 1993 – 1998 kommer SKB att vidareutveckla den metod för systematisering av scenarioutveckling som inletts genom SKI/SKB-projektet. Arbetet har redan påbörjats med att komplettera och uppdatera databasen samt att skapa visuella scheman och länkar mellan olika processer och händelser. Detta arbete kommer att fortsätta i samarbete med modellörer och sakkunniga inom respektive ämnesområden för att initiera kompletteringar av de modeller som används i beräkningarna inom säkerhetsanalysen.

Redan idag har vissa möjliga framtida händelser av typen mänskligt intrång (Human Intrusion) uppmärksammats att vara av sådan betydelse att de bör behandlas separat. OECD/NEA har tillsatt en arbetsgrupp som arbetar med dessa frågor ur ett internationellt perspektiv. SKB medverkar i denna arbetsgrupp.

Vissa FEP's kommer att vara starkt beroende av den kvalitetskontroll och tillverkningsmetodik som kommer att gälla för förvarets olika delar. Dessa FEP's behöver ses över i det skede då systemets layout, materialval, byggnadssekvens m m till fullo fastläggs.

### 2.4.3 Närzonen

#### **Modeller för radionuklidinventarium och resteffekt**

Radionuklidinventariet och resteffekten kan med tillräcklig noggrannhet beräknas med hjälp av idag tillgängliga modeller och databaser. Inga insatser planeras under perioden.

#### **Modeller för nuklidtransport**

De modeller som användes för radionuklidtransport i närzonen i SKB 91 motsvarar de krav som kan ställas på säkerhetsanalyser som skall genomföras inom programperioden. Mycket lite ytterligare arbete behövs inom området.

#### **Termodynamiska jämviktsmodeller och data**

EQ3/6-koden har de funktioner som krävs av en jämviktsmodell och inget ytterligare arbete är nödvändigt inom det området. Ytterligare sammanställningar av termodynamiska data är inte nödvändigt inom SKBs verksamhet. Däremot är det viktigt att bekräfta och validera för säkerhetsanalysen väsentliga data (framför allt radionuklidlösligheter). Detta kommer till största delen att utföras under kemiprogrammet, se kapitel 7.

#### **Kapselfunktion**

Med hänsyn till att kompositkapseln utgör SKBs prioriterade kapsel kommer denna kapsels funktion och säkerhet att granskas och redovisas under 1993.

Det nya kapselutformningen med stål kräver dessutom fortsatta studier av gasuppbyggnad och migration samt studier av mekaniska effekter av korrosionsprodukter. En förnyad genomgång av kriticitetsrisker under den långsiktiga förvaringen kommer att göras.

I den blyfyllda kapseln har blyets barriärfunktion försumrats. Eftersom den kan ha mycket stor inverkan, särskilt vid initial kapselskada, planeras ytterligare studier att genomföras.

Under 1996 kommer en förnyad funktionsanalys av närområdet att göras i den säkerhetsanalys som tas fram för NRL-ansökan om tillstånd att påbörja detaljerade undersökningar. Härvid tas också hänsyn till de val av material och metoder för tillverkning och kontroll som definieras i samband med projektering etc. av inkapslingsstation och djupförvar.

#### **Kemiska processer i närområdet:**

**Bentonitkemi.** Bentonitleran och dess föroreningar kommer att påverka grundvattensammansättningen närmast kapseln. Detta påverkar, i första hand, radioelementens lösligheter. Utveckling av en modell som kvantitativt beräknar dessa effekter har påbörjats.

**Cement i slutförvaret.** För att täta sprickzoner i berget kan det finnas behov av att använda stora mängder av cement. Detta kan medföra förhöjda pH-värden under relativt långa perioder. Effekten av denna pH ökning kommer att studeras.

#### **Övrigt avfall**

Endast begränsade insatser har gjorts på studier av förvar för långlivat Studsviksavfall och hårdkomponenter sedan KBS-3. En systematisk genomgång av dessa avfallstyper kommer att göras. Erforderlig anpassning/utveckling av modeller, för säkerhetsanalys av anläggningar och långtidfunktion, kommer att initieras.

#### 2.4.4 Fjärrområde

Den vidare utveckling av modeller för transport i fjärrområdet anpassas till behovet att genomföra funktionsanalyser på kandidatplatserna samt en integrerad säkerhetsanalys 1996. På vägen dit krävs uppföljande analyser till SKB 91, vidareutveckling av olika modellkoncept samt verifiering och validering av de beräkningsmodeller som avses bli utnyttjade i framtiden. En stor del av denna verksamhet kommer under perioden att kopplas till den internationella gruppen för grundvattenrörelser och nuklidtransport i sprickigt berg inom Äspö-projektet. Även INTRAVAL utgör ett viktigt forum för frågor kring validering.

Det generella FEM-programmet för grundvattenströmning och nuklidtransportberäkningar, NAMMU, bedöms även framledes kunna utnyttjas för storskaliga studier. Inom kort kommer en ny version att finnas tillgänglig vilken bl a innebär förenklingar vid pre- och postprocessering, snabbare numeriska lösare, inkludering av en speciell borrhålsmodell, möjlighet till sensitivitetsanalys samt förbättrad dokumentation.

Den metod som använts i SKB 91 för stokastisk kontinuummodellering av grundvattens rörelser kommer att vidareutvecklas. Beräkningsprogrammen HYDRASTAR och INFERENS ska förbättras, bland annat vad gäller dokumentation, presentation av resultat och användarvänlighet. Programmet HYDRASTAR har speciellt utvecklats för behoven inom SKB 91 och behöver generaliseras. Den stora datamängden för den statistiska analysen utgjordes i SKB 91 av data från vatteninjektionstester i enskilda borrhål i olika skalor. Vid t ex Äspö har ett stort antal interferenstester utförts vilka måste kunna användas. Denna utveckling förutses kunna genomföras under 1993.

En metodisk tillämpning av HYDRASTAR på ett nytt område ska genomföras i anslutning till karakteriseringen av kandidatplatserna. Stegvis ska informationen i form av fältdata införas vid modelleringen. Den inledningsvis generiska analysen kommer härigenom att successivt bli alltmer platsspecifik.

Som en direkt uppföljning av SKB 91 kommer nya geostatistiska metoder att prövas. Den statistiska modelloptimeringen av data från Finnsjöområdet som presenterats i /2-39/ kan kompletteras under 1993 med nya ansatser. En alternativ sk icke-parametrisk metod /2-40/ ska dessutom prövas med tillgängliga data under 1993. Denna metod har inte som förutsättning att konduktivitetfältet följer en viss fördelning. Vidare finns förutsättningar för att sk mjuka data kan föras in vid modelleringen.

Inom ramen för betingad simulering med HYDRASTAR kan två olika sätt identifieras för att generera grunddata i form av hydraulisk konduktivitet i borrhål i olika skalor

- värden baserade på vatteninjektionstester i enskilda borrhål analyserade med kontinuumsantagande,
- blockkonduktiviteter härledda från sprickstatistik och pumpstester med hjälp av en diskret sprickmodell.

Den första metoden har nyttjats i SKB 91 medan den andra kommer att prövas under de närmaste åren. Kopplingen mellan modellansatserna finns beskriven i /2-41/.

Observera således att HYDRASTAR ses som ett verktyg för stokastisk kontinuummodellering av grundvattenrörelser och att olika statistiska grundmodeller kan prövas inom ramen för detta.

Parallellt med det ovan beskrivna programmet för modellering av fjärrområdet kommer utveckling att ske av den sk kanalnätverksmodellen. Ansatsen kan ses som en vidareutveckling av den mer extrema kanalmodellen för beräkning av radionuklidtransport där berget anses bestå av ett fåtal vattenförande kanaler utan blandning

sinsemellan. Den nya modellen är ämnad för beräkningar i regional skala där blandning mellan kanaler kan förväntas. Tillämpning med borrhålsdata förutses under de kommande åren.

#### 2.4.5 Funktions- och säkerhetsanalyser

Tidplanen för lokalisering av ett djupförvar för demonstrationsdeponering innebär följande analysinsatser under perioden 1993 – 1998:

- Insatser knutna till geologiska förundersökningar på en första kandidatplats:
  - En översiktlig regional hydrogeologisk modellering som stöd för den regionala karakteriseringen av förvarsområdet.
  - Modellering inom ramen för det lokaliseringsskedet av bl a strömbanor för grundvatten som underlag för inplacering av ett tänkt förvar på kandidatplatsen.
  - Under förundersökningens skeden för grundläggande och kompletterande undersökningar genomförs fortlöpande utvärdering av kandidatplatsens hydrogeologiska förhållanden med hjälp av analysmodellerna.
  - En säkerhetsanalys för ett tänkt förvar på kandidatplatsen tas fram som delunderlag för utvärderingen av kandidatplatsen.
- En parallell insats med samma modelleringsverktyg genomförs för en andra kandidatplats med ca ett halvt års förskjutning.
- Bearbetning av ovanstående underlag till en funktions- och säkerhetsanalys under 1996 som utgör underlag för ansökan om tillstånd för detaljerade geologiska undersökningar på en av platserna. Säkerhetsanalysen utgör också en del av underlaget till den uppdatering som till samma tidpunkt skall göras av miljökonsekvensbeskrivningen.
- Säkerhetsutvärdering och sammanställning av säkerhetsrapporter för inkapsling, transport och deponering av avfallet görs i anslutning till projekteringen av inkapslingsstationen och djupförvaret. De tekniska barriärernas kvalitet och konsekvenserna av ev missöden utgör kopplingar till analysen av den långsiktiga radiologiska säkerheten.



## 3 ANVÄNT BRÄNSLE

### 3.1 NUVARANDE KUNSKAPSLÄGE

Direktdeponering av använt kärnbränsle aktualiserades under 1970-talet och forsknings- och utvecklingsarbete syftande till direktdeponering pågår i flera länder. Sverige, Kanada och USA har i över ett decennium varit ledande när det gäller undersökningar av använt bränsles stabilitet i förvarsmiljö. En sammanfattning av forskningsresultaten fram till 1988 har gjorts av Johnson och Shoesmith /3-1/ och denna översiktsartikel är fortfarande den mest aktuella i ämnet.

Den första svenska undersökningen av använt bränsles beständighet i vatten gjordes 1977, som en del i KBS-2 arbetet, men programmet fick sin nuvarande omfattning 1982. En översikt över de resultat och data som kommit fram inom SKBs program under de senaste åren ges i /3-2/ där de jämförs med den databas, som insamlats under de senaste tio åren. I detta kapitel ges en kortfattad lägesbeskrivning avseende undersökningarna av inverkan av bestrålningshistorien, grundvattenkemin och redoxpotentialen på bränslets beständighet. Experiment med bränsle exponerat för grundvatten under realistiska förvarsförhållanden har också inletts.

Utöver undersökningar av använt bränsle och obestrålad  $UO_2$  har även ett program för studier av naturliga vittringsprodukter på uraninit pågått sedan några år.

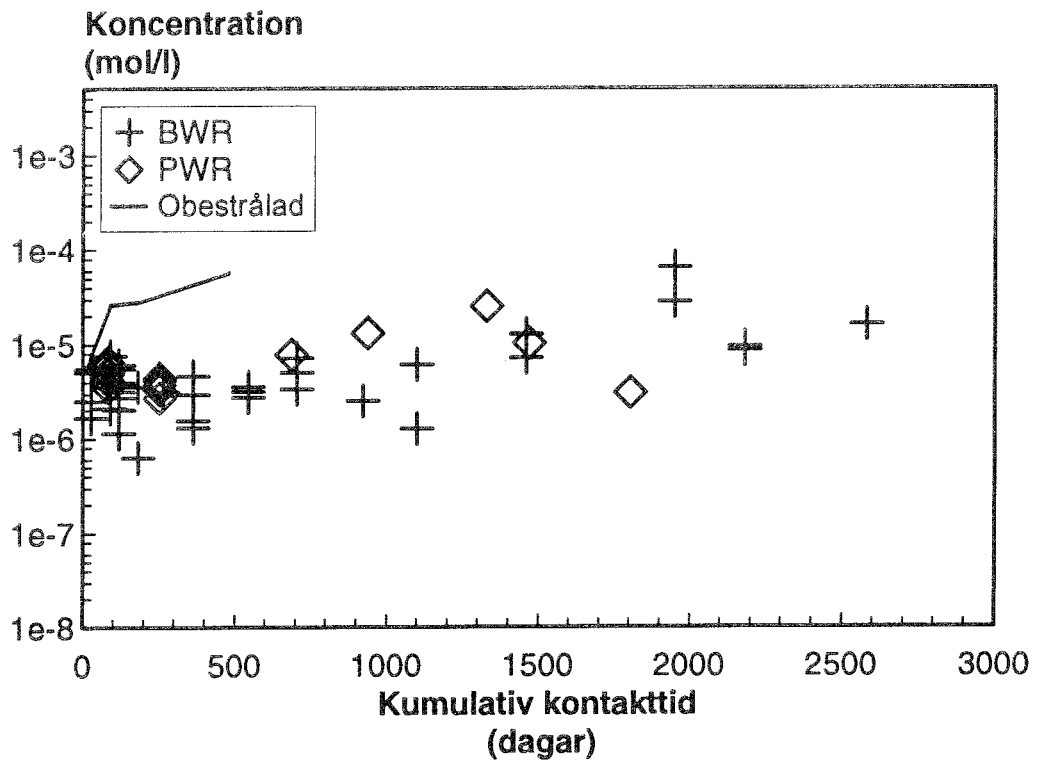
#### 3.1.1 Korrosion av högaktivt bränsle

##### Oxiderande förhållanden

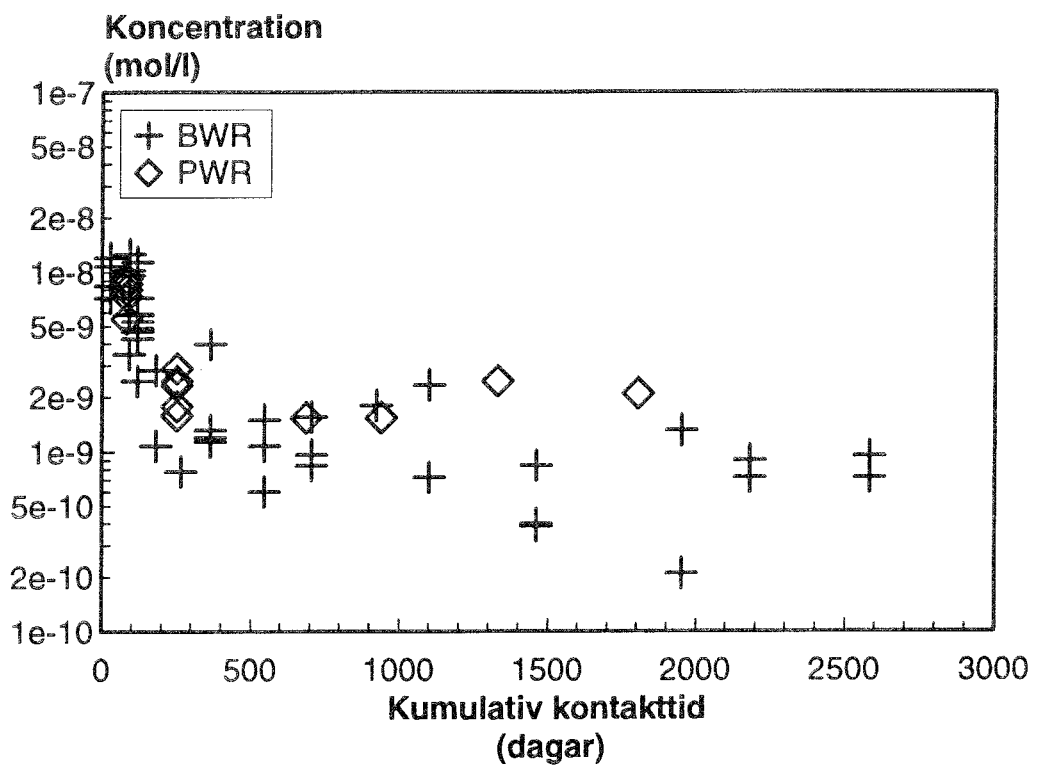
###### *Aktinider*

Data för koncentrationerna av uran och plutonium exponerat i grundvatten (bikarbonathalt:  $2 \cdot 10^{-3}$  mol/l) finns tillgängliga för kumulativa kontakttider på över sju år. För uran kan man se att under de första veckornas kontakt stiger uranhalterna i vattnet till i medeltal  $4 \cdot 10^{-6}$  mol/l och ligger kvar på denna nivå under 500 dygn, se Figur 3-1. Därefter stiger koncentrationen sakta och efter 2000 dygn ligger medelvärdet på  $2 \cdot 10^{-5}$  mol/l, men med en större spridning mellan mätvärdena än för kortare exponeringstider. Som jämförelse visas också data för obestrålad  $UO_2$  i Figur 3-1. Obestrålat bränsle når den högre koncentrationen snabbare än bestrålat bränsle. På grundval av nu tillgängliga data är det inte möjligt att avgöra om uranhalterna kommer att stabiliseras på den något högre nivån, eller om ökningen kommer att fortsätta.

Även plutoniumhalten i grundvatten når snabbt ett konstant värde. Efter kortare exponeringstider är koncentrationerna relativt höga, med en spridning mellan  $10^{-9}$  och  $10^{-8}$  mol/l. Vid längre kontakttider sjunker halterna i lösning och förefaller stabiliseras på en nivå strax under  $10^{-9}$  mol/l, se Figur 3-2. Det högutbrända bränslet innehåller ungefär 1% plutonium. Vid en kongruent frigörelse borde plutoniumhalten i lösning vara 100 gånger högre än vad som uppmäts. Jämförelser med experiment med andra bränsletyper visar att koncentrationen plutonium i lösning är oberoende av andelen plutonium i bränslet. Både extremt lågutbränt bränsle och bridreaktorbränsle har jämförbara plutoniumhalter i grundvatten, trots att det lågutbrända bränslet endast har ca 1% av plutoniuminnehållet i lättvattenreaktorbränsle och bridreaktorbränslet består av 20%  $PuO_2$ .



*Figur 3-1. Urankoncentrationerna i syntetiskt grundvatten som funktion av kumulativ kontakttid (oxiderande förhållanden).*



*Figur 3-2. Plutoniumkoncentrationerna i syntetiskt grundvatten som funktion av kumulativ kontakttid (oxiderande förhållanden).*

I avjonat vatten är uranhaltan mycket låg och ofta under den analytiska detektionsgränsen. Detta motsvarar koncentrationer på under  $10^{-7}$  mol/l. För plutonium är förhållandet det omvända. Koncentrationerna stiger till något över  $10^{-8}$  mol/l. Detta är mer än tio gånger den plutoniummängd, som motsvaras av mängden upplöst uran. Under oxiderande förhållanden är alltså inte utlakningen av radionuklider begränsad av uranupplösningen.

#### *Löslighetskontroll*

Resultaten tyder på någon form av löslighetskontroll för frigörelsen av aktinider. Om beräkningar görs med termodynamiska jämviktskoder får man emellertid en inte helt acceptabel överensstämmelse mellan experiment och beräkningar om man antar att systemet står i jämvikt med den närvarande luften. Plutoniumlösligheterna är inte redoxkänsliga för variationer i redoxpotential inom det område som kan vara relevant för experimenten, men beräkningarna förutsäger en urankoncentration på 10 gånger den uppmätta. En möjlig förklaring till avvikelserna kan vara att redoxförhållandena under experimenten inte styrs av syrehalten i systemet utan av en U(IV)/U(VI) buffring.

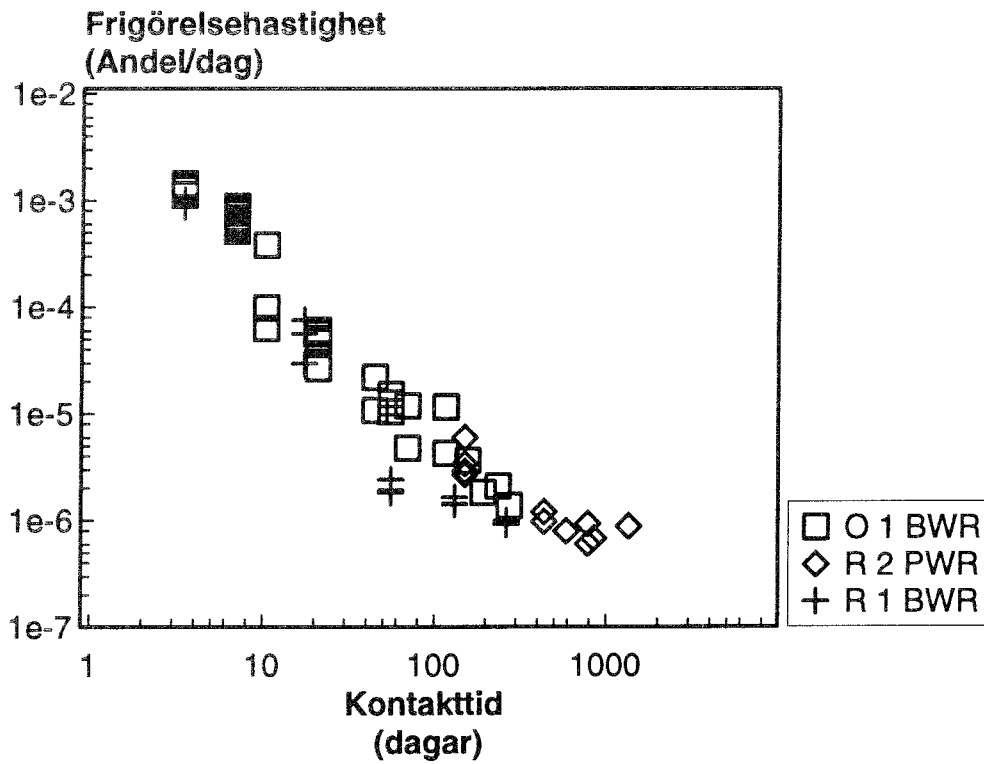
Diskrepansen mellan experiment och beräkningar blir ännu mer slående om man tar med neptunium i jämförelsen /3-3, 3-4/. Om neptuniumhalten är löslighetsbegränsad, måste den fasta fasen vara en Np(IV) fas. Om Np(V) styrde lösligheten, skulle neptuniumkoncentrationen vara flera storleksordningar större än vad som uppmäts i experimenten. Det finns mycket få data för Np tillgängliga och det kan inte på detta stadium uteslutas att neptuniumhalten styrs av bränsleupplösningen och inte är löslighetsbegränsad.

#### *Fissionsprodukter*

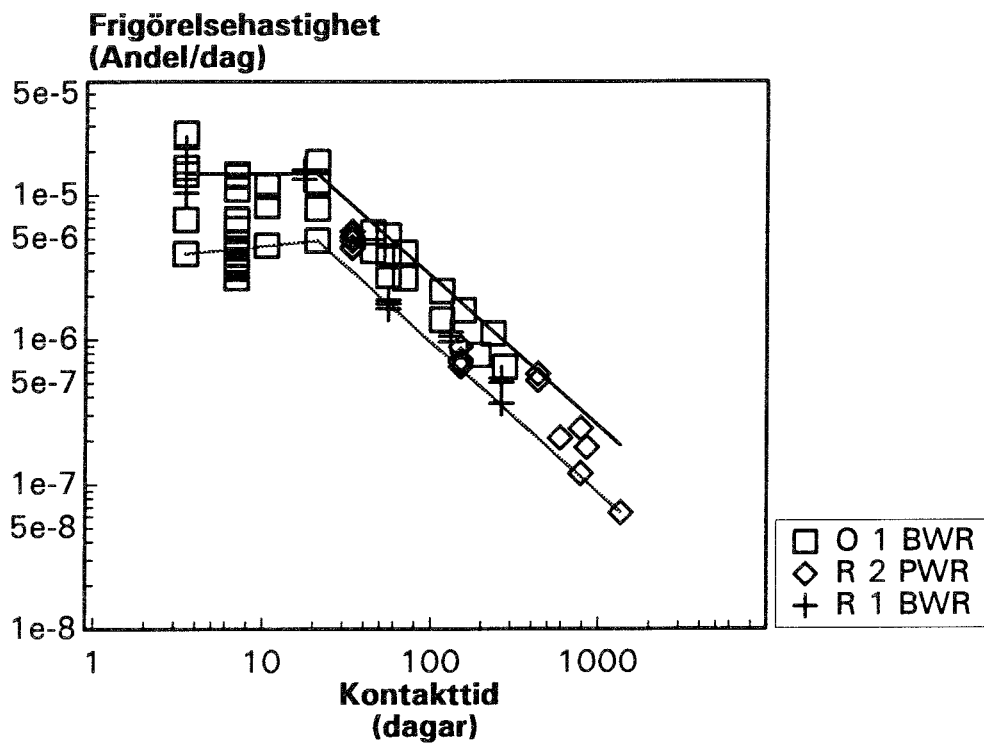
Experimentella data tyder på att frigörelsen av aktiniderna är löslighetsbegränsad. Därför kan inte mätningar av deras koncentrationer i laklösningen ge någon direkt information om de processer, som styr bränsleupplösningen. Det vore värdefullt att kunna mäta frigörelsen av en eller flera fissionsprodukter, som ett mått på bränslekorrosionen. För att detta skall vara möjligt krävs att dessa fissionsprodukter är homogent fördelade i bränslet och att deras löslighet i grundvatten är tillräckligt hög. Ett uppenbart val hade varit någon av de sällsynta jordartsmetallerna, som bildas i bränslet med högt utbyte och som bildar fast lösning med urandioxidmatrisen. Tyvärr är frigörelsen av dessa fissionsprodukter löslighetsbegränsad på samma sätt som aktiniderna. Det råder fortfarande vissa osäkerheter kring vilken fissionsprodukt som speglar bränsleomvandlingen. Tillsviare betraktas utlakningen av strontium som ett mått på graden av bränsleomvandling även om detta inte är helt invändningsfritt.

Exempel på olika lakningsbeteenden kan man finna för fissionsprodukterna cesium, strontium och teknetium. Cesium och även jod migrerar till en viss del (typiskt ca 1%) till bränsleytan och gapet mellan bränsle och kapslingsrör under reaktordriften. Denna andel frigörs snabbt när bränslet kommer i kontakt med vatten, se Figur 3-3 och ger höga initiala lakhastigheter. Därefter avtar lakhastigheten med tiden och tycks efter några hundra dygn ligga till synes konstant på  $10^{-6} \text{ d}^{-1}$ .

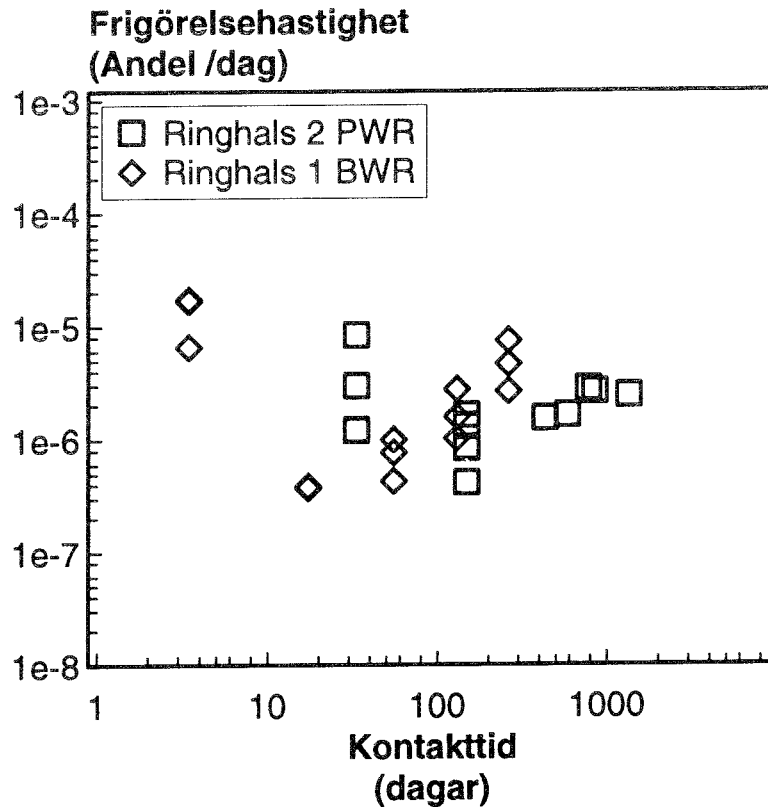
Motsvarande data för strontium visas i Figur 3-4. Här är lakhastigheten konstant under de första veckorna och avtar sedan med tiden, på liknande sätt som cesium. Strontiumvärdena är emellertid alltid lägre än motsvarande cesiumvärden. Efter fem år har lakhastigheten sjunkit till  $10^{-7} \text{ d}^{-1}$  och data tyder på att hastigheten fortfarande sjunker med tiden. Det är ännu inte helt klarlagt om strontiumlakningen efter längre kontakttider representerar lokal korrosion i områden som är anrikade på strontium eller om den är ett mått på UO<sub>2</sub>-upplösningen. Om det senare skulle visa sig vara fallet, kan den högre cesiumlakningen komma från korrosion i korngränser, där



Figur 3-3. Frigörelse hastigheten för  $^{137}\text{Cs}$  under oxiderande förhållanden.



Figur 3-4. Frigörelse hastigheten för  $^{90}\text{Sr}$  under oxiderande förhållanden.



Figur 3-5. Frigörelsehastigheten för  $^{99}\text{Tc}$  under oxiderande förhållanden.

cesium anrikats. Sådana anrikningar har observerats med mikrosonanalyser /3-5/. Motsvarande anrikningar av strontium har inte kunnat påvisas, men kan inte helt uteslutas på grund av osäkerheterna i strontiumanalyserna.

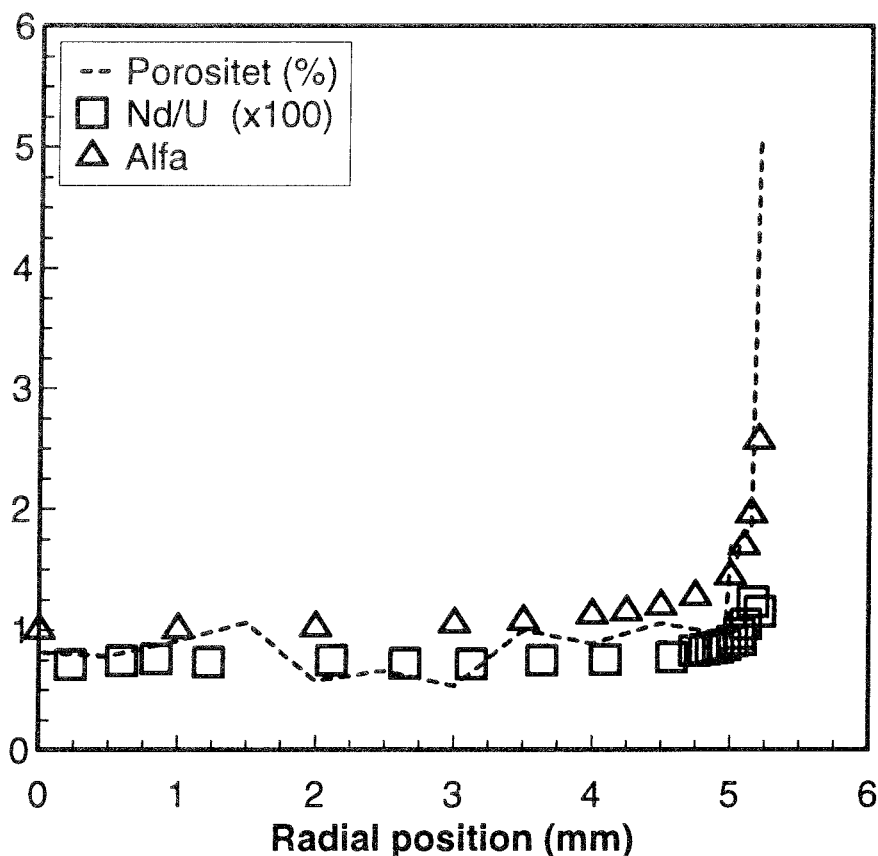
Teknetiumdata för oxiderande förhållanden visas i Figur 3-5. Spridningen i data är visserligen större än för cesium och strontium, med det är helt klart att teknetiumlakningen följer ett annat mönster. Lakshastigheten för teknetium är oberoende av kontaktiderna och ligger mellan  $10^{-5}$  och  $10^{-6} \text{ d}^{-1}$ . Efter några år är lakas teknetium snabbare än både cesium och strontium. Jämfört med dessa element, är det väl känt att teknetium förekommer i fissionsgasbubblor i korngränserna och som metalliska inklusioner tillsammans med Mo, Ru, Rh och Pd. Frigörelsen av teknetium kontrolleras troligen enbart genom oxidation och upplösning av dessa inklusioner.

#### Reducerande förhållanden

Djupa grundvatten är reducerande. Det är visserligen svårt att skapa och upprätthålla reducerande förhållanden i en hot-cell miljö, men ett flertal experiment har genomförts under såväl reducerande som anoxiska förhållanden. I dessa experiment har koncentrationerna av aktinider varit nära eller under detektionsgränserna. För uran har halterna varit under  $10^{-7} \text{ mol/l}$ , medan för övriga aktinider inte kunnat detekteras.

Förändringen av redoxförhållanden har avgörande betydelse för teknetiumhalterna i lösning, medan den bara i mindre omfattning påverkar utlakningen av cesium och strontium. Medelkoncentrationen av teknetium under reducerande förhållanden är  $6 \cdot 10^{-9} \text{ mol/l}$ , som är jämförbart med lösligheten av  $\text{TcO}_2$  ( $3 \cdot 10^{-8} \text{ mol/l}$ ).

Den första pulsen av frigjord cesium är oberoende av redoxförhållandena, eftersom den består av lättlösliga species. För strontium är det en mer markerad skillnad mellan



**Figur 3-6.** Radiell variation av bränsleporositet, utbränning och alfa-aktivitet i referensbränslet (BWR) från Oskarshamn-1.

oxiderande och anoxiska förhållanden under de första kontakterna med en snabbare minskning av lakstabiliteten med tiden vid anoxiska förhållanden. Efter ca ett år är emellertid skillnaderna i strontiumutlakning vid oxiderande och anoxiska förhållanden mycket små /3-2/. När låga redoxpotentialer uppnås med vätgas i närvaro av en palladiumkatalysator, ligger strontiumutlakningen ungefär tio gånger lägre än vid oxiderande förhållanden.

#### *Korrosionszoner*

Under de förväntade förhållandena i förvaret, med låga redoxpotentialer, kommer  $UO_2$  att vara stabilt och uranlösligheten mycket låg. Frigörelsen av de flesta radionukliderna från bränslet skulle då bero enbart på uranets löslighet. Denna situation skulle kunna störas av de oxidanter, som produceras genom radiolys av vattnet. Radiolys producerar visserligen ekvivalenta mängder reducerande och oxiderande species, men reaktionströgheten hos de reducerande species skulle kunna leda till lokala oxiderande förhållanden nära bränslets yta. För att rätt kunna tolka de resultat man får från analyser av vattenlösningar, som varit i kontakt med bränslet, är det nödvändigt att också veta från var i bränslet radionukliderna frigjorts.

Undersökningar syftande till detta har pågått sedan 1985 då långtidsexponeringar av BWR-bränsle i fyra olika bikarbonatlösningar startades. Utvärdering av dessa prov har påbörjats och parallellt med analyserna av de exponerade proverna har också referensprov undersökts. Figur 3-6 visar variationen i en bränslekuts, i radiell led, av porositeten, alfa-aktiviteten och utbränningen mätt som Nd/U förhållanden i bränslet. Porositeten och alfa-aktiviteten ökar brant mot bränslekutsens periferi. På grund av

denna kombination av ökad porositet och lokal alfa-dos utgör kutsperiferin en zon där ökade korrosionangrepp kan förväntas.

Figur 3-7 visar elektronmikroskopbilder av periferin på ett icke-korroderat bränslefragment och på två bränslefragment från samma zon som varit i kontakt med grundvatten i 1427 dagar respektive avjonat vatten i 1521 dagar. Bilderna visar tydligt ett korrosionsangrepp i periferizonen, som resulterat i en klar ökning av porositeten. Bränslet, som varit i kontakt med avjonat vatten visar också kristaller av ett  $\text{UO}_3$ -hydrat på bränsleytan. Samma typ av korrosion kunde inte dokumenteras på bränsleytor längre bort från periferizonen, men dessa områden visade indikationer på korngränskorrosion i samband med provprepareringen. Ytterligare undersökningar av detta slag är nödvändiga för att bättre förstå mekanismerna bakom bränslekorrosionen och frigörelsen av radionuklider.

#### *Effekterna av utbränning och linjär effekt*

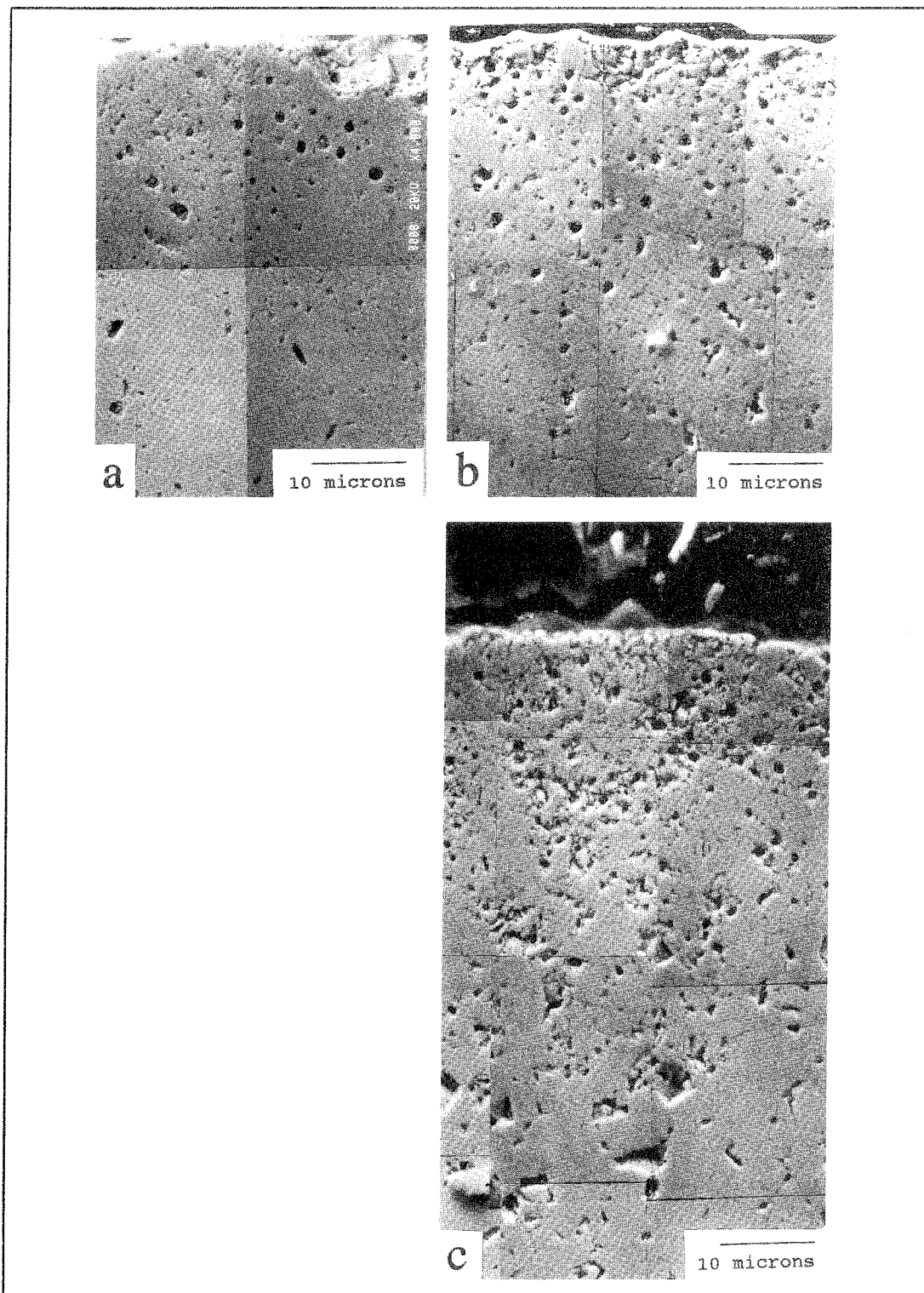
Det finns fortfarande flera frågor kring bränslekorrosionen, som inte är helt utredda: (a) är  $^{90}\text{Sr}$  frigörelsen en mått på bränslekorrosionen? (b) är nedgången på bara ca en faktor 10 i  $^{90}\text{Sr}$  frigörelsen under reducerande förhållanden orsakad av radiolys eller orsakas den av redoxoberoende processer? (c) om radiolyseffekterna är av betydelse, hur är relationen mellan dos och korrosion? (d) är korrosionsangreppen proportionella mot bränslets exponerade area eller dominerar andra faktorer?

Det är ofrånkomligt att de experimentella observationerna kan domineras av transienta fenomen, som saknar betydelse i långtidsperspektivet. Det är därför viktigt att få en god förståelse för dessa så att de modeller, som kommer att användas för säkerhetsanalyser beskriver relevanta scenarier. Ett led i detta är en pågående experimentserie, som syftar till att definiera och kvantifiera betydelsen av utbränning och effekttäthet (kW per meter stavlängd) för migrationen av radionukliderna i bränslet och, senare, för frigörelsen av radionuklider, när bränslet kommer i kontakt med vatten.

Flera experiment syftande till detta pågår, som t ex lakning av bränsle som utsatts för höga effekttätheter i en testreaktor efter uttag ur kraftreaktorn och undersökningar av isotoputbytesprocesser mellan fast fas och uranmättade lösningar. Bara preliminära resultat är ännu så länge tillgängliga från dessa undersökningar. Däremot finns resultat från det första årets korrosionstester av en segmentstav med varierande utbränning längs stavlängden (21 till 49 MWd/kg U). Den kumulativa frigörelsen av  $^{137}\text{Cs}$  och  $^{90}\text{Sr}$  visas i Figur 3-8 respektive 3-9. Både cesium och strontium visar en korrelation mellan frigörelse och utbränning med ökande utlakning upp till ca 40 MWd/kg U för att därefter vid högre utbränning åter minska. Vid låga utbränningar är frigörelsen av cesium som förväntat mindre, men också långsammare. Detta tyder på tillgängligheten för vatten har betydelse. Den oväntade nedgången vid högre utbränning, där både bränsleporositeten och radiolyseffekterna är störst, måste emellertid bero på andra utbränningsrelaterade effekter. Förhoppningsvis kommer de fortsatta undersökningarna att ge grund för en mer tillfredsställande utvärdering.

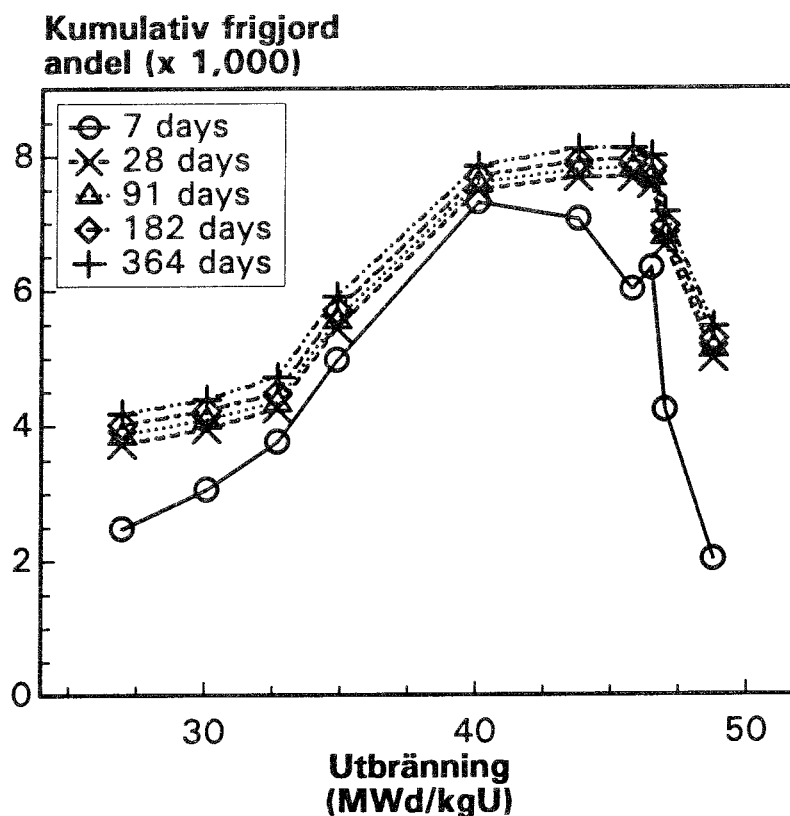
### **3.1.2 Andra komponenter i närområdet**

En preliminär undersökning av inverkan av bentonit på bränslekorrosionen rapporterades 1988 /3-6/. Denna studie genomfördes i en utspädd bentonitsuspension och syftade i första hand till att undersöka om sorptionen på bentonitpartiklarna kunde leda till en förhöjning av bränslekorrosionen. Några sådana effekter kunde vid oxiderande förhållanden inte observeras. En serie experiment som på ett mer realistiskt sätt simulerar förhållandena i ett slutförvar startades också under senare delen av 80-talet. I dessa experiment lakades utbränt bränsle i kontakt med kompakterad bentonit under anaeroba förhållanden. I vissa av experimenten har även stål och koppar varit närva-



**Figur 3-7.** Fotomosaik från bränsleperiferin på (a) icke korroderat bränsle, (b) bränsle som varit i kontakt med syntetiskt grundvatten i 1427 dagar och (c) bränsle som varit i kontakt med avjonat vatten i 1521 dagar.





*Figur 3-8. Kumulativ frigjord andel av  $^{137}\text{Cs}$  som funktion av utbränning (grundvatten: oxiderande förhållanden).*

rande. En preliminär utvärdering av kontakttider på upp till ett år har gjorts /3-7/ och den slutliga analysen av exponeringar på upp till fem år pågår, men inga data kan ännu rapporteras. Resultaten efter ett år visar på en förväntad hög mobilitet för cesium. Redan efter 100 dagar har ca 1% av cesiuminventariet frigjorts. Detta är helt i överensstämmelse med vad som observerats i tidigare lakteter. Den apparenta diffusiviteten i bentoniten konstaterades vara  $5 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ .

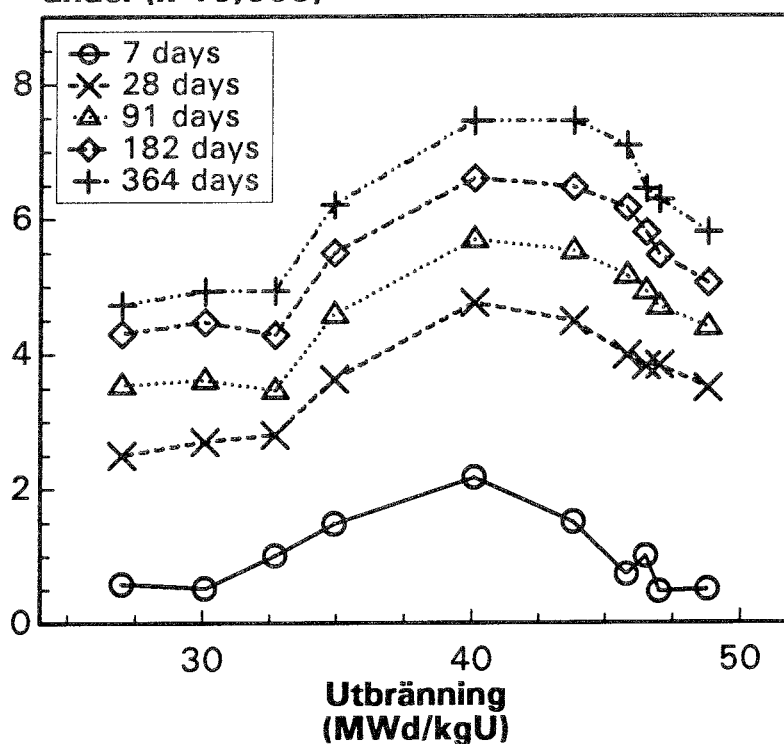
Frigörelsen av teknetium visade sig vara låg. Endast ca 0,006 % av inventariet hade frigjorts efter 100 dagar. Detta är jämförbart med vad som observerats under anaeroba förhållanden. Under oxiderande förhållanden i lakexperiment är andelen en faktor tusen högre. Också den uppmätta diffusiviteten antyder att teknetium föreligger som Tc(IV).

Aktiniderna visade sig ha mycket låg mobilitet. Efter ett år hade plutonium diffunderat mindre än en halv millimeter från bränsleytan. Denna låga mobilitet tyder på att plutonium föreligger som Pu(IV). Utvärderingar av femårsproverna kommer att ske under 1992/93.

### 3.1.3 Modeller

Djupa grundvatten är reducerande. Under sådana förhållanden är urandioxid stabil och har en mycket låg löslighet. Frigörelsen av radionuklider från bränslematrisen skulle vara begränsad av urans löslighet i grundvattnet. Genom radiolytisk sönderdelning av vatten skapas emellertid oxiderande och reducerande species. Oxidanter är de mer reaktiva och skulle kunna orsaka en oxidation av bränsleytan.

### Kumulativ frigjord andel (x 10,000)



Figur 3-9. Kumulativ frigjord andel av  $^{90}\text{Sr}$  som funktion av utbränning (grundvatten: oxiderande förhållanden).

I SKB 91 användes en modell för bränslekorrosion som förutsatte oxidativ upplösning orsakad av radiolytiskt producerade oxidanter genom alfa-radiolys av vatten. Oxidationshastigheten antogs vara proportionell mot alfa-dosraten. Som en mycket konservativ övre gräns för oxidationshastigheten användes strontiumfrigörelsen under oxiderande förhållanden efter några års exponering /3-8/.

Även om modellen sätter en övre gräns för bränsleomvandlingen och frigörelsen av radionuklider, kvarstår emellertid flera osäkerheter. Det är inte klart belagt att strontiumlakningen är ett mått på bränsleoxidationen. Om strontium som segregerat i bränslet bidrar till lakningen, kan oxidationen vara betydligt lägre än vad som antagits. Det är heller inte klarlagt vilken effekt de radiolytiskt producerade oxidanterna har på  $\text{UO}_2$ -matrisen. Den kan vara betydligt lägre än vad som antagits i SKB 91. Vissa data tyder på att den är så låg att en modell för oxidativ upplösning inte är tillämpbar /3-9/.

#### 3.1.4 Naturliga analogier

Studier av omvandlingsprocesser i naturliga uraninitförekomster har pågått sedan 1988 /se t ex 3-10, 3-11, 3-12/. Experimentella undersökningar kan ge en god information om korrosionsprocesser och mekanismer men kan givetvis inte visa hur systemet urandioxid-grundvatten utvecklas under långa tidsperioder. Dessa långtidseffekter kan belysas med genom studier av omvandlingsprocesser i naturliga uraninitförekomster under mildt oxiderande och reducerande förhållanden.

Det är emellertid viktigt att observera att det är skillnad på naturlig  $UO_{2+x}$  (uraninit) och bestrålat bränsle. Naturliga uraniniter innehåller till exempel ofta radiogent bly, som kan ha betydelse för omvandlingsprocesserna. Dessutom förutsätter löslighetsberäkningar med geokemiska modeller termodynamisk jämvikt. Detta behöver inte vara fallet. I synnerhet vid laboratorieundersökningar bildas meta-stabila korrosionsprodukter. Liknande meta-stabila faser förekommer också i naturen och de spelar en viktig roll för bildandet av de faser som i ett längre tidsperspektiv styr uranlösligheten.

Under oxiderande förhållanden, som vid Shinkolobwe i Zaire, har uraninit omvandlats till ett flertal sekundära mineral. Bildningen av uranyloxidhydrat är kinetiskt gynnad, men i kiselhaltiga vatten omvandlas dessa till mer stabila uranylsilikater. Sammansättningen av uranyloxidhydraterna speglar i första hand sammansättningen på de ursprungliga uraniniten, medan uranylsilikaterna vanligen speglar sammansättningen på det grundvatten de bildats i kontakt med /3-12/.

För att kunna använda naturliga uranförekomster som naturliga analogier för använt bränsle är därför viktigt att dels den ursprungliga uraniniten karakteriseras väl och att förstå betydelsen av de fasta faser som bildas i olika geokemiska miljöer.

### **3.2 MÅL FÖR PERIODEN 1993–1998**

Dagens förståelse och dataunderlag kan utnyttjas för att bestämma en övre gräns för radionuklidernas frigörelse ur använt kärnbränsle. Bränslestudierna fortsätter med målen

- att successivt vidareutveckla förståelsen för radionuklidernas frigörelse ur använt bränsle och att successivt vidareutveckla modellerna inför den säkerhetsanalys som planeras till 1996,
- att ta fram en realistisk modell för radionuklidernas frigörelse ur bränslet till början av 2000-talet inför ansökan om tillstånd för lokalisering och koncession för djupförvaret.

### **3.3 PROGRAM 1993–1998**

De huvudfaktorer, som påverkar korrosionen av använt bränsle och frigörelsen av radionuklider i grundvatten är:

- 1) Bränslets bestrålningshistoria, som påverkar mikrostrukturen hos bränslet och har stor betydelse för utskiljningen av radionuklider till sprickor i bränslekutsen och till korngränser.
- 2) Redoxpotentialen och inverkan av alfa radiolysen på redoxförhållandena i närområdet.
- 3) Vattenkemin, speciellt i närvaro av andra komponenter i närområdet.
- 4) Aktinidernas och fissionsprodukternas löslighet.

Inom dessa områden finns fortfarande 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.
- Inverkan av radiolys främst alfa-radiolys på de redoxförhållandena närmast bränslet i en för övrigt syrefri miljö.

- Termodynamiska data för vissa element, som t ex Pu och Np. Detta gäller såväl species i lösning, som eventuella löslighetsbegränsade fasta faser.

Under föregående treårsperiod har tyngdpunkten i arbetet förskjutits från relativt stora serier av lakexperiment på BWR och PWR bränsle till experiment där mer specifika frågeställningar studeras. För närvarande fortsätter endast några av experimenten från de tidigare försöksserierna med BWR och PWR bränsle med långtidsexponeringar.

De större pågående experimentserierna syftar till att undersöka effekten av utbränningen och linjär effekt på bränslekorrosionen.

### 3.3.1 Karakterisering av använt bränsle

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<sub>2</sub>-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.

En standardmetod för karakterisering av använt bränsle har utvecklats under den senaste perioden. Denna används för att systematiskt kartlägga de särdrag i bränslet, som kan förväntas ha betydelse för bränslekorrosionen. Dessa kan sedan jämföras med resultatet från motsvarande karakterisering av bränsle, som varit i kontakt med vatten för att kunna identifiera zoner med korrosionsangrepp. Detta arbete är komplicerat och tidsödande, men nödvändigt, för att få den kunskap om kinetiken och mekanismerna för korrosion, som krävs för att modellera förloppet.

Området har hög prioritet och insatserna planeras ligga på samma nivå som föregående period. Tekniken kommer att i första hand vara optisk mikroskopi, elektronmikroskopi och mikrosondanalys. Avsikten är att bestämma lokal koncentrationen av fissionsprodukterna strontium, molybden, cesium och xenon, för att kartlägga migrationen i bränslet under drift och av neodym, för att få ett mått på den lokala utbränningen.

### 3.3.2 Radiolys

De naturliga reducerande förhållandena i djupa grundvatten kan störas av strålningsfältet kring bränslet. De experimentella data som finns tillgängliga visar att radikaler som bildas under gamma-radiolys av vatten kan orsaka oxidation av UO<sub>2</sub>. Efter ca 1000 år har emellertid gamma- och beta-fälten avklingat till en nära försumbar nivå jämfört med alfa-fältet, som avtar endast långsamt med tiden. Oxidanter producerade genom radiolys skulle kunna orsaka en oxidativ omvandling av bränslet, åtföljt av en frigörelse av radionuklider. Det kan alltså vara rimligt att anta att förhållandena på och nära bränsleytan är oxiderande men storleken på den radiolytiska effekten inte är känd.

Undersökningar av radiolytisk oxidation av bränsle i syrefria system kommer att genomföras under perioden. En del av dessa experiment kommer att genomföras inom ramen för ett nu pågående samarbetsprojekt med AECL, Kanada. För att kunna genomföra detta har kapaciteten för kemisk analys av laklösningar avsevärt förbättrats under föregående period.

### 3.3.3 Korrosion av högaktivt bränsle

Korrosionsstudierna and PWR och BWR bränsle kommer att fortsätta under de närmaste åren, men med färre och mer specifika experiment. Även analysinsatserna kommer att bli mer omfattande för varje experiment, som ett resultat av de förbättrade analysmöjligheterna. Tyngdpunkten i experimentprogrammet kommer att ligga på exponeringar i anaeroba och reducerande grundvatten. Dessutom kommer experiment att utföras vid förhöjd temperatur. Syftet med undersökningarna är att fastställa hastigheten på bränslekorrosionen efter att uranmättnad inträtt som en funktion av redoxförhållanden, grundvattenkemi och bränslets utbränning och linjära effektbelastning. Tillsammans med resultaten från de specifika radiolysundersökningarna förväntas detta ge den information om radiolytisk oxidation, som behövs för den fortsatta modellutvecklingen.

### 3.3.4 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.

I SKB 91 användes en modell för bränslekorrosion som förutsatte oxidativ upplösning orsakad av radiolytiskt producerade oxidanter genom alfa-radiolys av vatten. Som en mycket konservativ övre gräns för oxidationshastigheten användes strontiumfrigörelsen under oxiderande förhållanden. Det är emellertid inte klart belagt att strontiumlakningen är ett mått på bränsleoxidationen. Om strontium segregerar i bränslet, kan oxidationen vara betydligt lägre än vad som antagits. Det är heller inte klarlagt vilken effekt de radiolytiskt producerade oxidanterna har på UO<sub>2</sub>-matrisen. Vissa data tyder på att den är så låg att en modell för oxidativ upplösning, som använts i SKB 91, inte är tillämpbar annat än under ett initialt skede.

Arbetet utgår tills vidare från 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 alfa aktiviteten avklingat, kan bränsleupplösningen beskrivas med hjälp av en löslighetsbegränsningsmodell.

### 3.3.5 Naturliga analogier

Under perioden kommer arbetet att vara inriktat på att öka förståelsen för uranoxidernas struktur och kristallkemi och U(VI)-föreningarnas omvandlingssekvens. Däri ingår att bland annat att ta fram en del av de grunddata som krävs för att identifiera korrosionsprodukter och för att modellera utbränt bränsles korrosion.

Data kommer att bli tillgängliga från flera naturliga analogiprojekt. Jämförelser mellan identifierade sekundära uranfaser och uranföreningarnas omvandlingssekvens från de olika lokalerna kan ge information om vilka generella slutsatser som kan dras. Det är också viktigt att kunna relatera eventuella skillnader till variationer i den ursprungliga uraniniten och till variationer den geokemiska miljön.

## 4 KAPSEL

### 4.1 NUVARANDE KUNSKAPSLÄGE

#### 4.1.1 Alternativa kapselmaterial

Koppar har varit referensalternativ för kapselmaterial sedan KBS-2 arbetet i slutet av 1970-talet. Valet av koppar var i första hand baserat på koppars immunitet mot korrosion i syrefritt vatten. En första bedömning av koppars korrosionsbeständighet gjordes 1978 /4-1/. Denna kompletterades sedan 1983 inför KBS-3 rapporten /4-2/. Slutsatserna av båda studierna var att en kopparkapsel kommer att ha en mycket lång livslängd under förvaringsförhållanden.

Vissa osäkerheter kvarstod emellertid för lokal korrosion, främst gropfrätning och spänningskorrosion. Av dessa frågor har gropfrätning på koppar under såväl oxiderande som reducerande förhållanden ägnats störst uppmärksamhet och kunskapsläget 1992 finns redovisat i /4-3/.

Sedan KBS-3 utredningen har även alternativa kapselmaterial studerats, dels genom egna insatser och dels genom uppföljning av forsknings- och utvecklingsarbete bedrivet av andra organisationer. Flera av dessa kapselmaterial visat sig ha en mycket god korrosionsbeständighet, som t ex  $\text{Al}_2\text{O}_3$  och titan.

För de keramiska materialen identifierades tidigt fördröjt brott som en möjlig och svår förutsägbar brottmekanism. Fördröjt brott orsakas av långsam spricktillväxt från initiala defekter.

Flera försök att uppskatta hastigheten för spricktillväxt i en keramik-kapsel har gjorts, framför allt i Sverige och Schweiz. Provade  $\text{Al}_2\text{O}_3$  material visade sig ha uppskattade livslängder som skiljer sig med åtskilliga storleksordningar (se t ex /4-4, 4-5/). Differenserna beror sannolikt på skillnader i kornstorlek, föroreningar, sintringsprocedurer osv. Mätningarna utfördes på små provbitar, men det är väl känt att kroppar med större volym och yta har kortare livslängd. För att kunna bedömma livslängden för en fullstor kapsel måste dessutom fördelningen av spänningarna i kapselväggarna vara känd, vilket förutsätter fullskaleförsök. Mot bakgrund av de mycket stora osäkerheterna i erhållna experimentella resultat förefaller det vanskligt att med säkerhet fastställa en minsta livslängd för en keramik-kapsel.

Även för titan finns risker för fördröjt brott genom väteförsprödning, men även spaltkorrosion är möjlig i kloridhaltiga vatten. Titan utgör huvudalternativet i Kanada, där man lagt ned stor möda på att kartlägga riskerna för fördröjt brott. Sannolikheten har visats vara mycket låg, även om den inte kan försummas helt /4-6/. Jämfört med koppar tycks dock inte titan kunna erbjuda några klara fördelar som kapselmaterial i Sverige.

Stål som kapselmaterial har studerats av SKB sedan 1986. Stål har många fördelar tillverknings tekniskt eftersom det är ett väl känt konstruktionsmaterial, men kommer med nödvändighet att leda till en kortlivad kapsel. Dessutom kommer stål i förvaringsmiljö att leda till vätgasproduktion.

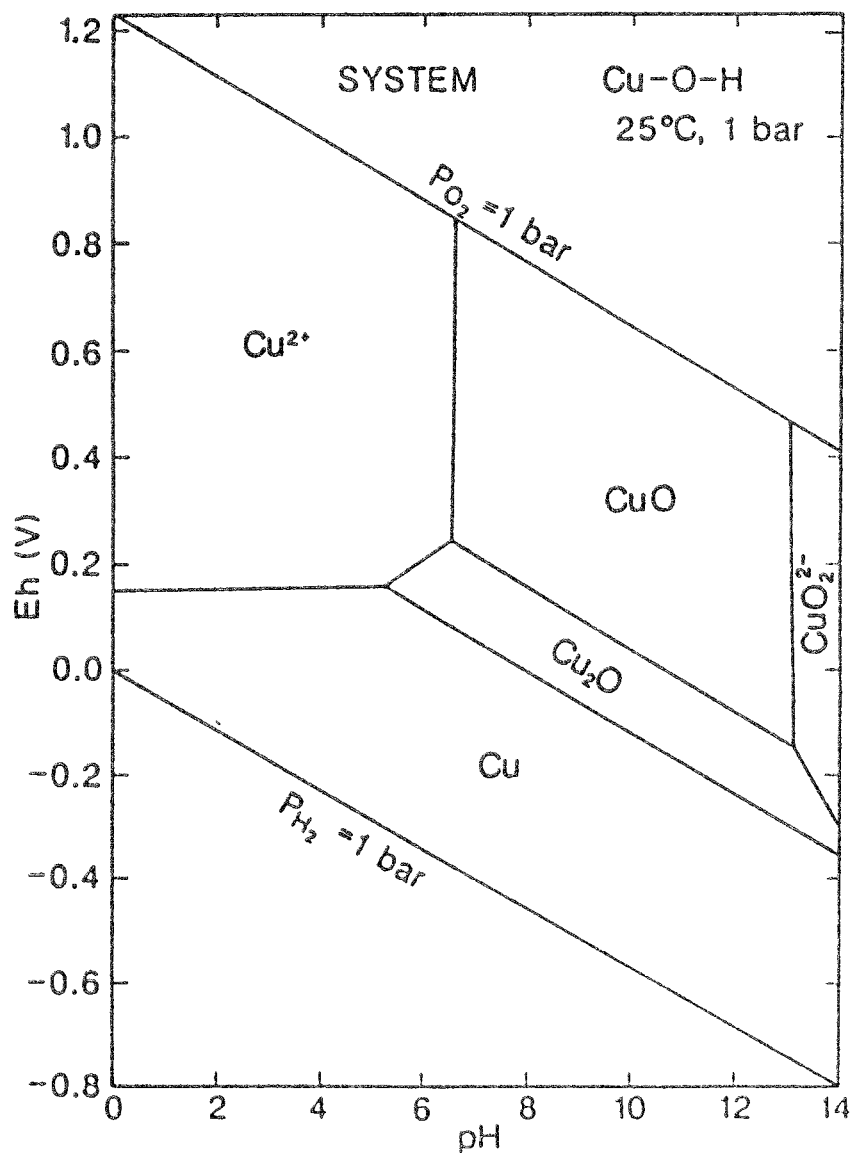
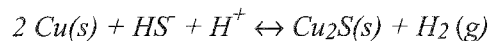
Koppar är ett material, som ger kapseln en mycket lång livslängd ur korrosionssynpunkt. Koppar har därför valts som kapselmaterial inför den fortsatta forsknings- och utvecklingsarbetet.

## 4.1.2 Korrosionsfrågor – koppar

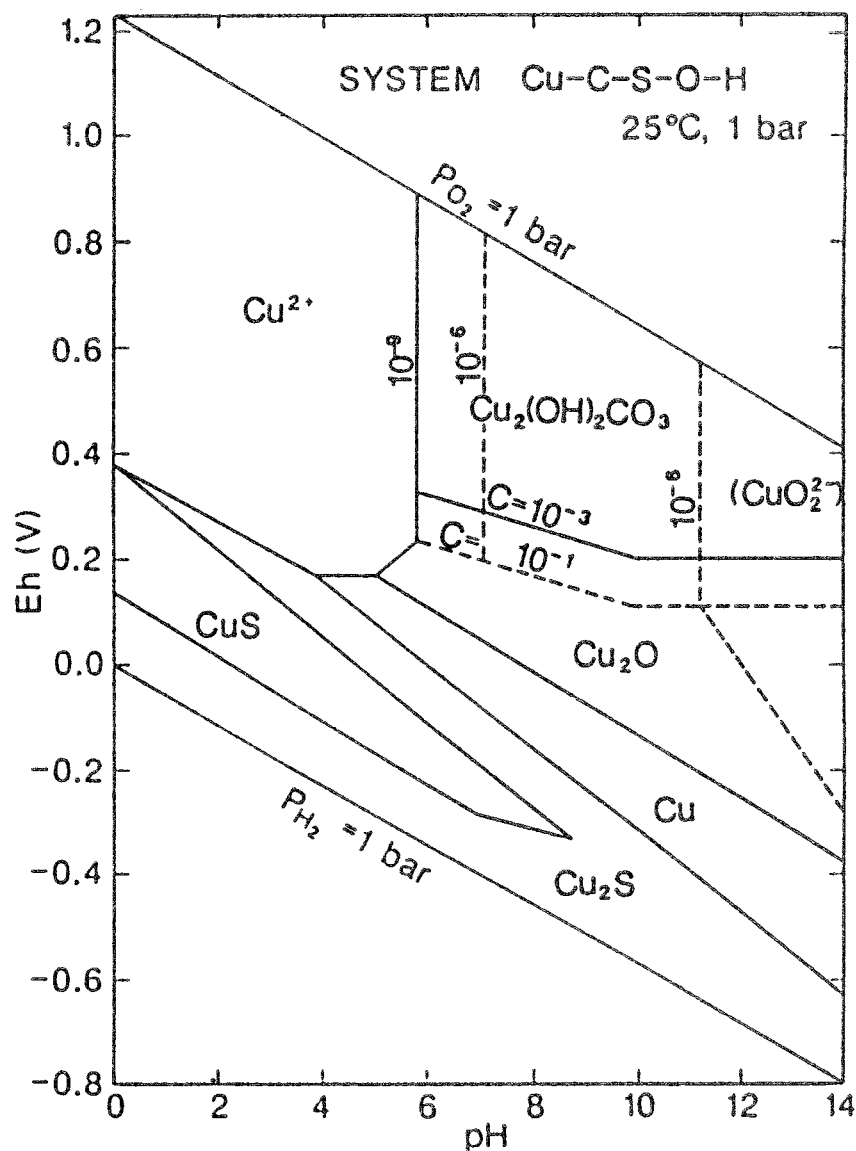
### Sulfidkorrosion

Under reducerande förhållanden är koppar immun mot korrosion i rent vatten, som framgår av Pourbaixdiagrammet i Figur 4-1. Koppars stabilitetsområde påverkas starkt av systemets kemiska sammansättning och är därför nödvändigt att identifiera de komponenter som skulle kunna påverka koppars termodynamiska stabilitet. Det är väl känt att närvaro av svavel märkbart reducerar koppars stabilitetsområde, se Figur 4-2.

Koppar kan oxideras av vatten i närvaro av kemiska substanser, som stabiliserar Cu(I) och Cu(II). Som framgår av Figur 4-2 är sulfid en sådan substans enligt reaktionen:

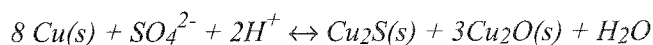


Figur 4-1. Potential pH diagram för koppar/vatten systemet (efter /4-7/).

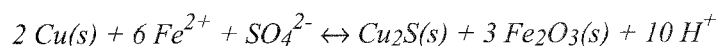


Figur 4-2. Potential pH diagram för koppar/svavel/kol/vatten systemet (efter /4-7/).

Koppar kan också oxideras av vatten i närvaro av höga koncentrationer av sulfat. Direkt oxidation enligt:



är inte möjlig i naturliga vatten, men i närvaro av ytterligare elektrondonatorer, är oxidation av koppar i princip möjlig:



Den forskning som bedrivits sedan KBS-3 har inte visat att skulle finnas anledning att i någon väsentlig del revidera tidigare slutsatser. Den förnyade analysen visar att inga rena korrosionsprocesser, som skulle kunna leda till kapselgenombrott kunnat identifieras /4-3/. En förnyad utredning av förutsättningarna för oorganisk reduktion av sulfat till sulfid har bekräftat de tidigare slutsatserna att denna process kan uteslutas i förvarsmiljön /4-8/. Senare utredningar har även visat att organisk reduktion, som



begränsas av tillgången på organiskt material i buffert och grundvatten, inte utgör något hot mot kapseln integritet ens om obehandlad naturlig bentonit används som buffertmaterial /4-3/.

Gropfrätning vid sulfidkorrosion under reducerande förhållanden är en mycket osannolik process. Mekanismerna som styr korrosionsförloppet skulle leda till en utjämnning av korrosionsangreppet snarare än bildande av frätgropar. En inhomogen fördelning av korrodanter i bufferten eller en inhomogen tillförsel av korrodanter från grundvattnet skulle dock kunna leda till ojämn allmänkorrosion av kopparytan. Den begränsade tillgången på korrodanter leder emellertid till att en eventuell korrosion av denna typ inte avsevärt minskar kapselns livslängden.

### **Syrekorrosion**

Den mängd syre som kan tänkas bli instängt i förvaret i samband med förslutningen leder inte till någon korrosion av betydelse. Under den tidsperiod då syret finns kvar i förvaret finns det emellertid förutsättningar för gropfrätning. Reaktionen mellan syret och pyrit i bentoniten leder dock till att de mildt oxiderande förhållanden, som kan underhålla gropfrätning, är begränsad till några hundratals år. Modellutveckling för gropfrätning under mildt oxiderande förhållanden har påbörjats och framkomna resultat visar att för dessa tidsperioder är gropfrätningen inget hot mot kapselns integritet /4-9/. Vidareutveckling av modellen kommer pågå under de närmaste åren.

### **Spänningskorrosion**

I KBS-3 utredningen visades att spänningskorrosionssprickning är en mycket osannolik process i förvarsmiljön. Denna bedömning kvarstår, men spänningskorrosion kommer att utredas ytterligare i samband med att kapselkonstruktionen preciseras och då spänningstillstånden i kapseln under olika scenarier blir bättre kända.

## **4.1.3 Mekaniska aspekter**

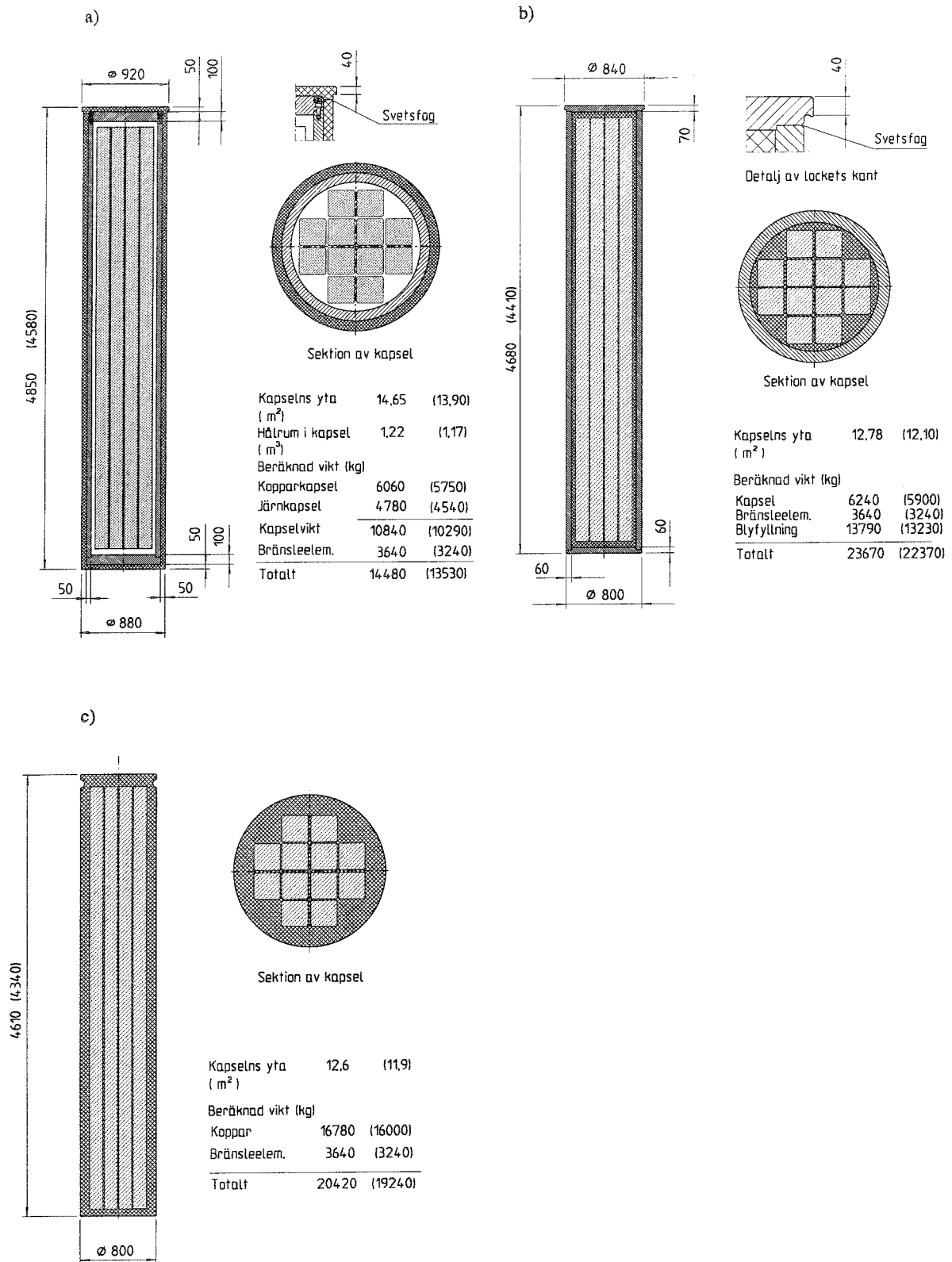
Under de senaste två åren har frågor rörande kapselns mekaniska integritet studerats mer ingående av en grupp om fem svenska experter från industri och högskolor /4-10/. De problemställningar som utretts har i första hand rört olika kopparkvaliteters krypduktilitet, restspänningar i kapslar efter förslutning och effekterna på en kopparkapsel efter en bergförskjutning. I huvudsak har tre olika kapselalternativ studerats:

- Kompositkapsel med yttre kopparhölje över en inre stödjande stålcyliinder.
- Blyfylld kopparkapsel.
- Het isostatpressad (HIP) kopparkapsel.

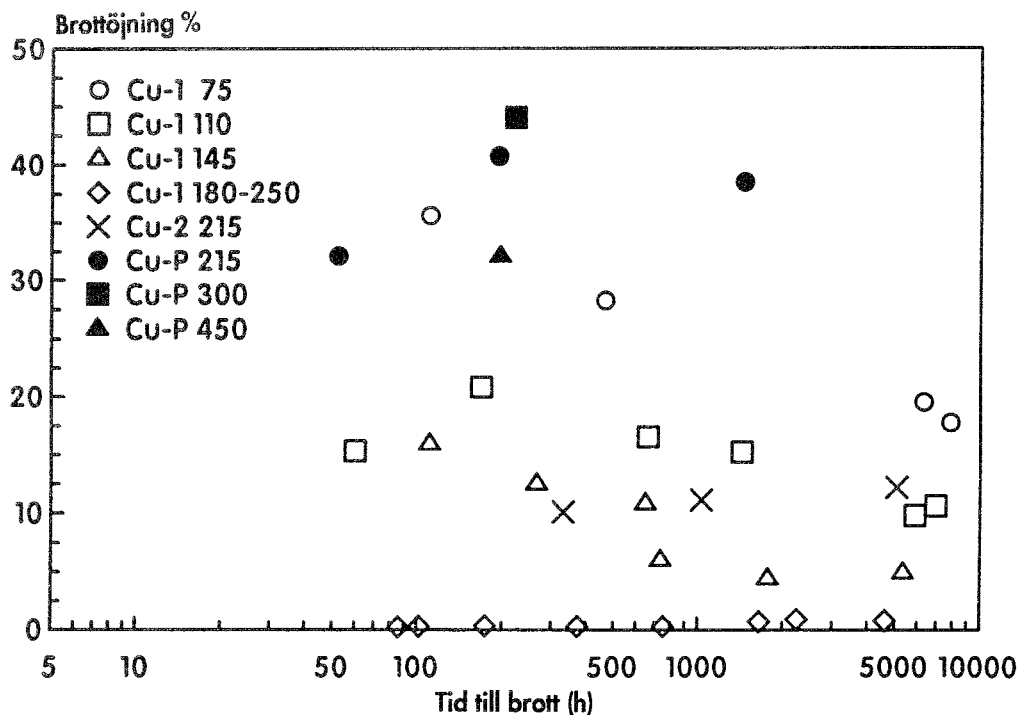
Dessa kapselalternativ finns illustrerade i Figur 4-3.

### **Krypduktilitet**

Under de senaste åren har ett större program för studier av koppars krypegenskaper genomförts. Under arbetets gång har det visat sig att ren syrefri koppar har oacceptabelt låg krypduktilitet vid förhöjd temperatur. Som framgår av Figur 4-4 sjunker krypduktiliteten för ren syrefri koppar till under 1% i temperaturintervallet 180 till 245°C medan den för syrefri, fosforhaltig koppar ligger kvar på en tillfredställande nivå. Mot bakgrund av dessa resultat bedömer expertgruppen ren syrefri koppar som en olämplig materialkvalitet samtidigt som man rekommenderar fortsatta krypprov och kryprelaxationsprov för att ytterligare verifiera materialegenskaperna för de kopparkvaliteter, som inte visar upp nedsatt krypduktilitet.



**Figur 4-3.** a) kompositkapsel koppar/stål  
 b) blyfylld kopparkapsel  
 c) HIP kapsel.



Figur 4-4. Brottöjning som funktion av brottid för två typer av ren syrefri koppar (Cu-1 och Cu-2) och för en syrefri koppar mikrolegerad (50 ppm) med fosfor (Cu-P) (från /4-11/).

#### Restspänningar efter tillverkning

Restspänningar efter förslutning av kapslarna har beräknats för både svetsade koppar/stål kapslar och för HIP kapslar. Vid svetsad förslutning kommer den maximala spänningen att ligga i intervallet 70 MPa till 100 MPa, beroende på gapet mellan det yttre kopparhöljet och det inre stålcyklern. Spänningarna är koncentrerade i svetsområdet. För HIP kapslar är motsvarande maximala värde ca 90 MPa, men med en restspänning på ca 50 MPa längs hela kapselytan. I båda dessa fall kommer en betydande del av spänningarna att snabbt relaxera genom krypdeformation. Restspänningarna för blyfyllda kapslar bedömdes ligga på jämförbara nivåer.

Spänningsnivåerna för samtliga studerade kapselalternativ är så låga att det inte föreligger någon risk för krypbrott om den fosforhaltiga kopparkvaliteten används.

#### Begrörelser

Modellberäkningar visade att begrörelser på upp till 10 cm inte kommer att utgöra något hot mot kapslarnas integritet.

#### Rekommendationer

Expertgruppens sammanfattande bedömning var att koppar/stål kapseln ur mekanisk synpunkt var det mest fördelaktiga alternativet. Gruppen identifierade också frågor som behöver ytterligare belysas genom forsknings- och utvecklingsinsatser under de närmaste åren. Dessa behandlas nedan.

#### 4.1.4 SKBs slutsatser

Det arbete, som utförts fram till 1992 har visat att koppar är ett väl lämpat kapselmateriäl inte enbart ur korrosionssynpunkt utan även vad avser övriga materialegenskaper. En kompositkapsel med ett yttre kopparhölje över en stödjande stål-kapsel har bedömts vara det ur mekaniskt synpunkt fördelaktigaste alternativet. Resultatet från PASS projektet har dessutom visat att detta alternativ även ur andra synpunkter är att föredra /4-12/. Kompositkapseln har därför valts för inkapsling av använt kärnbränsle. Teknik för blyfyllning kommer dock att utredas ytterligare som ett andrahandsalternativ.

## 4.2 MÅL FÖR VERKSAMHETEN

Målet för studierna av kapselmateriäl kommer för perioden 1993 –1998 att vara att bestämma vilken kopparkvalitet som skall användas och att utveckla svetsteknik, tillverkningsteknik och metoder för icke-förstörande provning, så att kapseltillverkning i full skala är möjlig omkring år 2000.

## 4.3 PROGRAM 1993–1998

Insatserna kommer att inriktas på att

- fullfölja studierna inom korrosionsområdet rörande:
  - förutsättningarna för spänningsskorrosion på koppar,
  - korrosion och radiolytiskt inducerad korrosion på stål-kapselns insida,
  - lokal korrosion i milt oxiderande miljö.
- till 1996 välja lämplig kopparkvalitet med avseende på krypegenskaper och svetsbarhet.
- utveckla tillverkningsteknik, svetsteknik och metoder för icke-förstörande provning.

### 4.3.1 Korrosion

Korrosionsegenskaperna för koppar är relativt väl utredda och kommer endast att kräva mindre insatser under de närmaste åren. Vissa frågor kring lokal korrosion på kopparkapseln under milt oxiderande förhållanden kan komma att behöva utredas ytterligare, men eftersom oxiderande förhållanden förväntas råda i förvaret under endast en kort tid efter deponering och förslutning kommer dessa insatser inte att prioriteras högt. Utöver dessa insatser kommer förutsättningarna för spänningsskorrosion på koppar att kräva ytterligare belysning.

Det finns även en viss risk för korrosion på stål-kapselns insida. Med den begränsade mängd korrodanter, som kan tänkas bli inneslutna i kapseln, utgör detta inget problem om risken för spänningsskorrosion kan försummas. Species som kan framkalla spänningsskorrosion skulle dock kunna bildas genom radiolys av fuktig luft inuti kapseln. I torr inert atmosfär elimineras denna risk.

Konsekvenserna av korrosion på de inre ståldetaljerna efter genombrott av det yttre kopparhöljet är ännu ofullständigt utrett. Det gäller i första hand tryckuppbyggnad orsakad av tillväxten av korrosionsprodukter och konsekvenserna av vätgasproduktion i förvaret. Dessutom måste riskerna för radiolytiskt inducerad spänningsskorrosion på stål-kapselns insida ytterligare utredas.

#### 4.3.2 Alternativa utformningar – blyfyllning

Som nämndes ovan är en blyfylld kopparkapsel ett andrahandsalternativ till kompositkapseln. Ur korrosionssynpunkt är denna kapsel givetvis likvärdig med kompositkapseln fram till genombrott på kopparhöljet.

Kvarstående osäkerheter rör i första hand tillverkningstekniken. De viktigaste frågorna rör dels tekniken kring blyfyllningen av en fullstor kapsel och styrningen av stelningsförloppet för blyet. Detta kommer att studeras dels genom att modellera blyjutningen och dels genom praktiska försök i modellskala.

Utöver detta måste också problemen kring förslutning med elektronstrålesvetsningen utredas. Detta gäller främst temperaturförhållandena kring svetszonen och den övre delen av blyfyllningen, där det finns risk för omsmältning av blyet.

#### 4.3.3 Svetsning av koppar

För närvarande är elektronstrålesvetsning det mest intressanta alternativet, med friktionssvetsning som ett andrahandsalternativ. De senaste årens utvecklingsarbete för elektronstrålesvetsning har i huvudsak varit inriktat på att utveckla system för svetsning utanför vakuum. Detta arbete har bedrivits av SKB inom ett internationellt samarbetsprojekt. Tekniken är nu tillgänglig och under det närmaste året kommer metoden att utprovas för svetsning av tjocka kopparsektioner.

Tillämpningen av båda metoderna för elektronstrålesvetsning, i vakuumkammare och under atmosfärstryck, utreds för närvarande. Den senare metoden ger mycket större flexibilitet, men kan inte klara av samma godstjocklekar som konventionell elektronstrålesvetsning. Resultatet av utvecklingsarbetet under de närmaste två åren är avgörande för det slutliga valet av metod, som beräknas kunna ske senast 1995.

Utvecklingen av svets teknik för en fullstor kopparkapsel prioriteras högt under perioden. Därefter inriktas utvecklingsarbetet på svetsning av fullstora prototypkapslar.

#### 4.3.4 Fyllnadsmaterial

Efter fyllning med bränsle har kompositkapseln en tomvolym på ca  $1 \text{ m}^3$ . Risk för kriticitet för vissa kapslar, om de fylls med vatten efter kapselbrott, kan för närvarande inte uteslutas. Av detta och eventuella andra skäl kan det visa sig önskvärt att minska tomvolymen genom efterfyllning med partikulärt material. Materialet kan antingen vara relativt inert, som till exempel kvartssand eller glaskulor eller vara kemiskt eller kärnfysiskt aktivt.

Ytterligare studier planeras innan man fastställer om ett fast fyllnadsmaterial skall användas och vilket material som i så fall är att föredra.

#### 4.3.5 Tillverkningskontroll – NDT

Samtliga steg i tillverkning, formning och förslutning av kapseln måste kontrolleras och dokumenteras. För stegen före inplaceringen av det använda bränslet och förslutningen kan detta ske med konventionella metoder, även om specifika utvecklingsinsatser eventuellt kommer att behövas. Metodik och teknik för kontroll av förslutningssvetsen kommer däremot att behöva utvecklas. Detta kan också komma att ställa krav på kontroll såväl av kopparmaterialets mikrostruktur som på utformningen av svetsen.

Detta utvecklingsarbete prioriteras högt och måste genomföras i nära samverkan med utvecklingen av svets tekniken. Tidigare utredningar har visat att ultraljudsprovning är

en framkomlig metod, men tekniken måste optimeras för koppar och för detektering av svetsdefekter som är typiska för elektronstrålesvetsning. En alternativ, eller kompletterande metod kan vara röntgentomografi. Utvecklingsarbete kommer också att inriktas på att utvärdera denna metods potential för tillverkningskontroll av förslutningssvetsen på kapseln.

## **5 BUFFERT OCH ÅTERFYLLNING**

### **5.1 BAKGRUND**

Den tekniska barriär som bentonitbufferten runt kapseln utgör har som främsta funktion att begränsa grundvattentransporten i närfältområdet och att skapa en lämplig kemisk och mekanisk skyddszon för kapslarna.

Buffertmaterial i olika blandningar av bentonit och ballast är även tänkt att användas vid återfyllning av utsprängda tunnlar, bergrum för service etc. samt tillfartskanaler från dagen, varvid funktionen främst är att begränsa möjligheten till transport av radionuklider längs dessa.

### **5.2 MÅL FÖR FOU-VERKSAMHETEN 1993–1998**

Val av kvalitet och sammansättning för buffert- och återfyllningsmaterial skall kunna göras omkring 1995. Valet utgör underlag till 1996 års säkerhetsanalyser av de två kandidatplatserna och för projektering av djuförvaret. Under perioden 1993–1995 skall sammanställningar göras av

- kunskaperna om bentonitens egenskaper,
- metoder för att bestämma dessa egenskaper, samt
- beräkningsmodeller för att beskriva buffertens homogenisering och långsiktiga buffertfunktion.

Därefter dras forskningen om materialparametrar ner och inriktas på framför allt studier av naturliga analogier för validering av beräkningsmodellerna. När det gäller de fysikaliska modellerna, reologi m m, skall validering ske i såväl laboratorieskala som genom fältförsök i Äspölaboratoriet. De sistnämnda blir dominerande och erhållna resultat används för fortlöpande uppdatering av materialmodellerna. Parallellt med detta genomförs en utveckling/anpassning av erforderlig teknik för tillredning av kapselpositioner, deponering av kapslar, återfyllning etc. se kapitel 11.

### **5.3 NUVARANDE KUNSKAPSLÄGE**

#### **Allmänt**

I FoU-program 89 angavs att särskilda insatser skulle göras under åren 1990–1995 för att utveckla en allmän reologisk/termomekanisk modell och att utveckla materialmodeller som relaterar mikrostrukturen hos bentonitbuffert och ler/ballastblandningar till vattenströmning, diffusion och värmeledning. Vidare angavs att programmet inriktas mot att fördjupa kunskapen om buffertens eller återfyllningens samverkan med angränsande berg. Insatserna syftade speciellt på karaktären på ”störda zonen” och på möjligheten att genom tätningsinsatser skapa stagnanta grundvattenregimer eller styra om grundvattenflöden.

Behovet av att effektivt kunna packa återfyllningar av ler/ballastmaterial markerades också i programmet.

Sammanfattningsvis specificerades följande huvudområden i FoU-program 89. De behandlas i denna redogörelse.

- Temperaturinducerade degraderingsprocesser i bentonit, omvandling av smektitmineral och cementering.
- Utveckling av en generell materialmodell som beskriver de mekaniska, reologiska, termiska och vattentransporterande egenskaperna för bentonitmaterial och ler/balastblandningar.
- Klarläggande av mikrostrukturens betydelse för transportprocesser som vattenströmning, jondiffusion och värmeledning.
- Beskrivning av närfältberg, speciellt ”störda zonen”, och undersökning av möjligheter att påverka dess konduktivitet.
- Modellering av samverkan mellan närfältberg och buffertar eller återfyllning.
- Material och teknik för återfyllning av schakt och tunnlar.

### Degraderingsprocesser i bentonit

Under åren 1989 – 1991, då bl a bentonitmaterialens kemiska beständighet undersöktes i en omfattande studie i Stripaprojektet, uppmärksammades två degraderingsprocesser som var kända tidigare men som nu kunnat kvantifieras /5-1/.

Den ena gäller den i Buffer Mass Test (BMT)-försöken i Stripa identifierade cykliska ”förångning/kondenserings”-processen vid vattenmättnad av bentonit som är exponerad för en temperaturgradient. Denna skulle, vid grundvatten med hög salthalt, kunna leda till saltanrikning nära kapslarna.

Den andra är den vid laborieförsök uppmärksammade processen av kiselfrigörelse vid temperaturbetingad lösning av smektitmineral. Detta kisel, som faller ut vid avkyllning, kondenserar på ett sådant sätt att den kan ge upphov till signifikant cementering och därigenom på ett praktiskt betydelsefullt sätt påverka lerans plasticitet och svällbarhet. Omfattande undersökningar av montmorillonit (det vanligaste smektitmineralet) under hydrotermala förhållanden och med olika slag av porvatten har visat att förändringarna huvudsakligen berör det mikrostrukturella partikelarrangemanget. De vatten som använts har varit destillerat vatten, starkt bräckt vatten av Forsmarktyp, dvs med Ca som dominerande katjon, och oceanvatten med utspädning till 1/3. Temperaturen har varit upp till 200°C och behandlingstiden på upp till närmare ett år.

Två motverkande processer äger rum: dels en partiell dehydratisering som innebär en minskning av antalet interlamellära hydratskikt med åtföljande ökning av porutrymme mellan kvasikristallerna av ”lamellpaket”, dels en termiskt inducerad disintegrering av dessa paket med en mikrostrukturell homogenisering som följd. Resultatet visar att de fysikaliska egenskaperna i huvudsak bibehålls hos såväl Na- som Ca-bentonit vid densiteter som överskrider ca 1,8 g/cm<sup>3</sup>.

En strukturell omvandling till icke expanderbara mineral (s k 10 Å-mineral) kan ske genom dels en permanent kollaps till följd av fullständig dehydratisering av ”lamellpaketen”, dels genom omvandling av lamellpaketen till växelagrade montmorillonit-flak och flak av hydratiserad glimmer (illit) samt nybildning av hydratiserad glimmer i porutrymmena mellan ”lamellpaketen”.

Det förstnämnda fenomenet, dehydratisering av lamellpaketen, har en praktisk betydelse först vid temperaturer över ca 130°C. Undersökningarna styrker också den tidigare antagna modellen för omvandlingen av montmorillonit och innebär att det är tillgången till kalium i fri form som är den bestämmande faktorn, åtminstone vid temperaturer över 60 å 70°C. Vid högre temperatur än ca 130°C sker en kraftigare påverkan, i synnerhet på Na-montmorillonit, sannolikt som följd av en övergång från montmorillonit till beidellit (ett aluminiumrikt smektitmineral), som spontant – oberoende av temperatur – omvandlas till hydratiserad glimmer vid tillgång på fritt kalium.



Innebörden av de senaste årens forskning kan sammanfattas på följande sätt:

- Vid temperaturer i området 70–130°C är den primära degraderingsmekanism en lösning av montmorillonitkomponenten med frigörelse av Si och Al, som nybildar hydratiserad glimmer i en takt som bestäms av intransport av kalium. Frigjort kisel och aluminium som inte bundits upp genom sådan nybildning fälls ut vid avsvällning och ger upphov till cementering.
- Vid temperaturer över 130°C ökar mängden löst kisel och aluminium. Ett överskott av kisel fås till följd av övergången till beidellit. Detta överskott leder till utfällning av cementerande kiselsyra, huvudsakligen i amorf form.
- I huvudsak bestäms kinetiken hos upplösningen av smektiten av koncentrationen av kisel i lerans porvatten och i omgivande bergs sprickvatten, samt av den takt med vilken nybildning av hydratiserad glimmer sker, m a o den process som binder kisel. På längre sikt, dvs när temperaturen sjunkit till ursprunglig nivå, löses mindre mängd smektit och mängden frigjort kisel per tidsenhet kan bli bestämmande för nybildningstakten även vid snabb intransport av kalium. Temperaturgradienten i bentoniten som omger kapslarna blir bestämmande för omfattningen hos cementeringen pga utfällning av kisel.

### **Generell materialmodell**

Syftet med utvecklingen av en generell materialmodell som beskriver de mekaniska, reologiska, termiska och vattentransporterande egenskaperna är att göra det möjligt att beskriva hela det fysikaliska förloppet i den högkompakterade bentoniten som omger kapslarna /5-2/. Syftet är att med hjälp av beräkningsprogram (typ ABAQUS) med rimlig noggrannhet kunna prediktera alla processer från utgångsläget med den mättade eller omättade bentoniten utsatt för en transient temperaturgradient som kan leda till omfördelning av ursprungligt vatteninnehåll, via skedet med vattenupptagning, svällning och homogenisering, till slutstadiet med en eventuell cementering och successiv omvandling av smektitmassan till hydratiserad glimmer. Modellen skall också göra det möjligt att beskriva spänningssituationen i bentoniten och kapslarna som följd av tektoniskt eller termiskt betingade förskjutningar utmed flacka sprickplan i berget. I dagens läge kan de mekaniska processerna i viss utsträckning beskrivas medan de som gäller mognadsprocessen återstår att modellera.

### **Mikrostruktur och transportprocesser**

En generell mikrostrukturell modell (GMM) för smektitiska leror utvecklades under 1989–1992 för kvalitativ och kvantitativ bestämning av den hydrauliska konduktiviteten som funktion av densitet, elektrolythalt och art av elektrolyt /5-3/. Modellen, som också ger besked om temperaturpåverkan och en halvkvantitativ bild av svällningstryckets beroende av densiteten, ger förklaringen till de skilda egenskaperna hos Na- och Ca-bentonit.

### **Samverkan mellan närfältberg och buffert eller återfyllning**

Den experimentella bestämningen av närfältbergets karaktär och genomsläpplighet i Stripaprojektets sista fas bekräftar en tidigare skisserad principiell modell för hur närfältbergets hydrauliska konduktivitet påverkas av sprängning och spänningssamlagring. Fältförsök i Stripa har gett anvisning om hur och i vilken omfattning som man kan åstadkomma tätning med hjälp av bentonit- eller cementbaserade material som injekteras. I en tidigare fas har ett praktiskt fall med tätning av en slits runt ett schakt genomförts framgångsrikt och möjligheten att kombinera dessa metoder bedöms ge den bästa möjligheten att effektivt stänga av vattenflöde i axiell led.

### **Återfyllning av schakt och tunnlar**

Schakt och orter skall inte efterlämna högkonduktiva förbindelser mellan biosfär och kapslar. Återfyllning måste ske oberoende av detaljutformning av förvarssystemet.

Kravet på återfyllningen avgörs av lokala förhållanden vad gäller bergets vattengenomsläpplighet, sprickorientering, hydraulisk gradient och angränsande vattenledande stråk, samt av behovet av och möjligheter till effektiv lokal pluggning. Avsevärda delar av återfyllningen kan utgöras av mycket effektivt packad moränlera, relativt bentonitfattiga blandningar av material med glacialt ursprung eller bergkrossmaterial.

### **Materialkaraktisering**

Kvalitetssäkringen när det gäller buffertar och återfyllningar har ägnats särskilt uppmärksamhet sedan mitten av 1980-talet då valet av bentonitmaterial ledde till definition av nödvändiga egenskaper hos ca 7 000 ton bentonitmaterial av sardinskt ursprung för isolering av betongsilon i SFR /5-4/.

För att få en grund för jämförelse mellan olika bentonitmaterial och för att få underlag för att pröva om offererat eller levererat material kan accepteras har en metod för karakterisering utvecklats och prövats. Den omfattar provningsmomenten:

- Kemisk analys.
- Mineralogisk analys (XRD).
- Svällbarhet (XRD, EG).
- Katjonbytesförmåga.
- Mikrostrukturell studie.
- Kornstorleksfördelning.
- Hydraulisk konduktivitet.
- Svälltryck och svällförmåga.
- Flytgräns.
- Krypegenskaper.
- Termisk ledningsförmåga.

### **Sammanfattning av forskningsresultat**

#### *Transportegenskaper*

Transportegenskaperna hos den högkompakterade bentoniten med avseende på hydraulisk och termisk konduktivitet är idag kända som funktion av mineralinnehåll, densitet, temperatur och kemisk porvattensammansättning. De kan beskrivas av en generell mikrostrukturell modell som skall vidareutvecklas för att beskriva också jondiffusionstransport och inverkan av mineralomvandling. En modell för kemiskt betingad omvandling till icke expanderande mineral (hydratiserad glimmer) med beaktande av samhöriga cementeringsprocesser har formulerats och kommer att användas vid såväl kommande laboratorieförsök med artificiell omvandling av montmorillonitrik bentonit, som på några väldefinierade geologiska exempel.

#### *Tekniska barriärens mekaniska egenskaper*

De reologiska egenskaperna hos högkompakterad bentonit som funktion av mineralinnehåll, densitet, temperatur och kemisk porvattensammansättning är idag delvis kända och fungerande preliminära materialmodeller och beräkningstekniker finns. Med kommande fördjupad kunskap fås grunden för att formulera en fullständigare materialmodell med vilken man har förutsättningar att kunna prediktera hela förloppet av förändringar som kapselinbäddande bentonit undergår under inverkan av temperatur, porvattenkemi och tektonik.

## 5.4 PROGRAM 1993–1998

### Allmänt

Under åren 1993–1995 koncentreras arbetet på karakterisering av bentonitbaserade material och utveckling av modeller för prediktering av sådana materials beteende och funktion i ett slutförvar. Under 1993-1998 planeras och påbörjas storskaliga försök i Äspölaboratoriet för att demonstrera väsentliga funktioner som inte fullt ut kunnat prövas i Stripa. Exempel på försök som aktualiseras i Äspölaboratoriet är: elektrolytanrikning under loppet av vattenmättnaden, spontan inträngning i sprickor, gasperkolering och kapsel deformation. En viktig uppgift är att mera ingående studera fysikalisk och fysikalisk/kemisk samverkan mellan buffertar och närfältberg.

### Transportprocesser

Jontransport och därmed orsakade förändringar av mikrostruktur och mineralsammansättning beskrivs fenomenologiskt och kvantitativt med hjälp av en utvecklad version av den mikrostrukturella modellen. Den ger besked om hur mineralfasen och den mikrostrukturella porositeten fördelas i lermatrisen och ger förutsättningar för kvantitativ modellering också av kat- och anjondiffusion som funktion av densiteten.

### Mekaniska processer

Materialmodeller och beräkningsteknik för att beskriva mekaniska processer m m utvecklas under perioden. En beskrivning av fullständigare och fungerande modeller för materialval och beräkningsgång kommer att inkluderas i ett slutdokument, som innebär avstämning av aktuella kunskapsläget år 1995.

### Materialkarakterisering

Karakteriseringsmetoden som tillämpats under 1990 och 1991 för beskrivning av tre kommersiella bentonitmaterial, kommer att utnyttjas för karakterisering av ytterligare material, inklusive bentonit/ballastblandningar, för att utöka underlaget för att etablera ett standardiserat förfarande vid materialval och beräkningsgång.

## 6 GEOVETENSKAP

### 6.1 INLEDNING

#### 6.1.1 Bergets roll i djupförvaret

Sverige ligger geologiskt sett inom den Baltiska urbergsskölden som huvudsakligen består av mer än 900 miljoner år gamla bergarter. Den dominerande kristallina berggrunden utgörs av gnejser och graniter. Berget är en viktig förutsättning för förvaringen av det använda kärnbränslet enligt den princip som utvecklats i Sverige. Syftet med förvaret är, som tidigare nämnts, att systemet med tekniska och naturliga geologiska barriärer skall isolera avfallet under så lång tid att de radioaktiva ämnena hinner att avklinga till naturliga strålningsnivåer. Direkt strålning från avfallet kan förhindras genom ett några meter tjockt och intakt kristallint bergblock. Den enda möjlighet på vilken avfall, som deponerats djupt nere i berget, kan påverka människor, djur och växter, är därför en transport av radionuklider från förvaret med bergets grundvatten till biosfären. Denna transport kan ske i berggrundens spricksystem. Grundvattenomsättningen i sprickigt urberg i Sverige är generellt sett mycket låg på djupare nivåer och därför är förvaret tänkt att förläggas ca 500 m under markytan.

Den geovetenskapliga forskningen vid SKB är relaterad till den kristallina berggrunden och till den tilltänkta förvarsutformningen. Forskningsinsatserna styrs främst av behovet av indata till de långsiktiga säkerhetsanalyser som görs. Vidare skall de geovetenskapliga FoU-insatserna vara till nytta för de anläggningstekniska frågeställningar som är förknippade med utbyggnaden av ett djupförvar.

Berget har ett antal fundamentala egenskaper som utnyttjas för förvarets långsiktiga funktion och säkerhet. Dessa är:

- Mekaniskt skydd.
- Kemiskt stabil miljö.
- Långsam och stabil grundvattenomsättning.

Egenskaperna kan vara mer eller mindre kopplade till varandra genom fysikaliska eller kemiska processer.

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

Av grundläggande betydelse för säkerheten 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 stabil under långa tidsrymder. Bergets kemiska miljö är även viktig för hur radionuklider kan transporteras. Här är växelverkan mellan nuklider och berg av betydelse.

Den låga grundvattenomsättningen i berget har betydelse både för barriärernas beständighet och för långsam transport av nuklider i berget. Vattenomsättningen styrs generellt av markytans topografi och av bergets genomsläpplighet vilken i sin tur beror av sprickigheten. Dessa faktorer är alla mycket stabila 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. Eftersom det är svårt att med experiment klarlägga hur denna växelverkan sker på en specifik plats i ett långt perspektiv används teoretiska modeller. I vilken mån modellerna kan bekräftas är av grundläggande betydelse för säkerhetsanalyser. Det är stora volymer av ett 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. För att beräkna kapsellivslängd krävs data om grundvattnets lokala omsättning och dess kemi. För att beskriva hur nuklider fixeras och transporteras i berget krävs mer information. Det är en angelägen uppgift för den pågående forskningen om berggrunden att pröva olika modellers giltighet och begränsningar.

### 6.1.2 Principen för undersökningar i kristallint berg

Geovetenskapen har i historiskt perspektiv varit en beskrivande vetenskap där huvudsakligt intresse ägnats de geologiska formationernas bildningssätt (genes) och generella egenskaper. Den tillämpade inriktning som geovetenskapen har inom kärnbränsleavfallens hantering ställer ökade krav på kvantifiering av ingående processer och förutsägelser in i framtiden. Bergets stora heterogenitet innebär att generaliseringar ej låter sig göras utan att även olika bergegenskapers variabilitet beskrivs. T ex gäller för den hydrauliska konduktiviteten i kristallina bergarter att skillnaden i medelvärden mellan olika bergarter är mindre än variationsbredden inom respektive bergart. Dessutom kan egenskaperna och deras variation bero av i vilken skala som ett visst problem betraktas.

Det är alltså viktigt att undersökningar i berg bedrivs i olika skalor (stegvis) och då iterativt, dvs successiv kunskapsuppbyggnad med alltmer detaljerad information. Ett statistiskt synsätt krävs i större utsträckning än tidigare för att beskriva berggrunden, se Figur 6-1.

För ett djupförvars funktion i geobarriären diskuteras vanligen följande skalor:

- Regionskala (1–10 km).
- Anläggningsskala (100–1000 m)
- Blockskala (10–100 m)
- Detaljskala, närområde (0–10m)

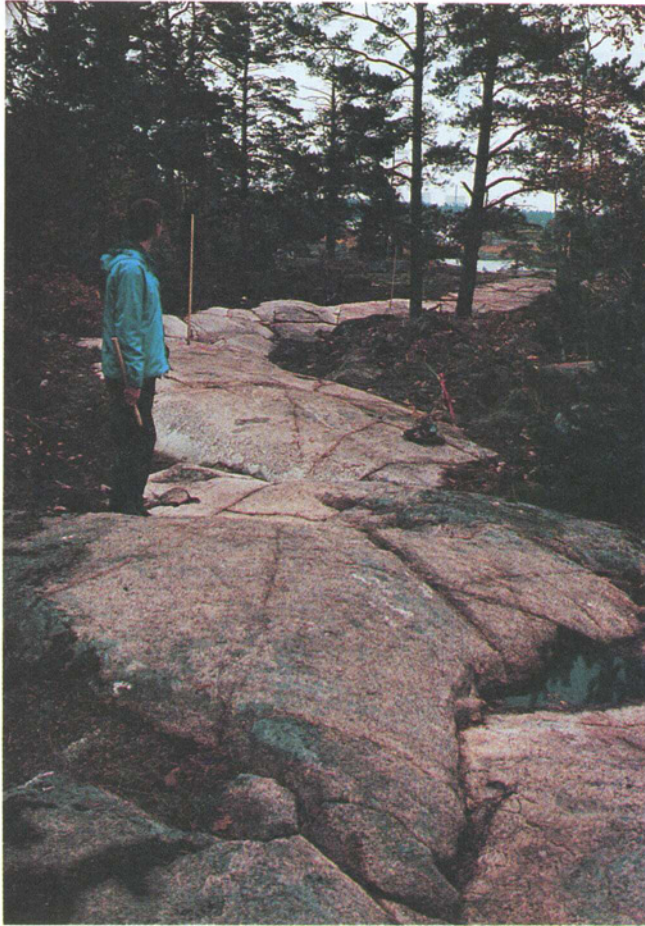
I den regionala skalan studeras förvaret i sitt storskaliga översiktliga sammanhang, t ex med hänsyn till landhöjning, tektonisk stabilitet och regionala hydrologiska kretslopp.

I anläggningsskalan studeras förvaret som en helhet med dess inverkan på omgivningen. Flöde och transport i sk fjärrzonsmodellering är t ex viktiga delar av en säkerhetsanalys för ett förvar.

Blockskalan beskriver skillnader i egenskaper inom förvaret, medan närområdet brukar definieras som området närmast avfallet. Närområdet antages bli påverkat av avfallet i sig eller av bergguttagets störning och är avhängigt förvarsutformningen.

Sammanfattningsvis är principen för undersökningar i berg en successivt ökande detaljeringsgrad i en arbetssekvens enligt:

- Datasamling, observationer.
- Upprättande av en begreppsmodell över området vad gäller strukturer, kemiska och fysikaliska förutsättningar (konceptuell modell).



*Figur 6-1. Inom Äspöprojektets förundersökningsfas genomfördes geologiska och hydrogeologiska undersökningar i olika skalor. Bilden åskådliggör den sprickkartering på håll som ägde rum i rensade och iordningställda diken.*

- Beräkningskedde.
- Analys.

### **6.1.3 Geovetenskapliga verksamhetens omfattning och samordning**

Det geovetenskapliga programmet vid SKB omfattar bred kunskapsuppbyggnad inom geologi, geofysik, bergmekanik och geohydrologi. I programmet ingår även metodutveckling och utveckling av numeriska datormodeller. En stark koppling finns till SKBs verksamhet för instrumentutveckling, se kapitel 9.

Aktiviteterna och projekten inom det geovetenskapliga programmet har ofta en samordning med andra specialområden som t ex geokemi och vattenkemi. Vidare är arbetet integrerat med de insatser som har bedrivits eller bedrivs inom:

- Stripaprojektet.
- Äspölaboratoriet.
- Projekt Alternativstudier för Slutförvar (PASS).
- Säkerhetsanalyser (t ex SKB 91).
- Naturliga analogier.
- Lokaliseringsprogrammet.

Ovanstående program och projekt beskrivs i separata kapitel i föreliggande FUD-program eller som fristående underlagsrapporter.

#### 6.1.4 Övergripande mål för det geovetenskapliga programmet

Den geovetenskapliga forsknings- och utvecklingsverksamheten vid SKB har som generellt mål

- att inför lokaliseringen vidareutveckla kunskaper om hydrogeologiska och bergmekaniska förhållanden för att bättre kvantifiera osäkerheter och marginaler i bergets förmåga att isolera avfallet.

Viktiga delmål är därvid

- att vidareutveckla modeller för beräkning av grundvatten i sprickigt berg, för vattenflöden vid glaciation och deglaciation, för kopplade fenomen som temperatur, bergspänningar och hydraulisk konduktivitet samt för bergmekanik i en takt som anpassas till modellbehovet vid analyser av kandidatplatsernas funktion och långsiktiga säkerhet,
- att tillse att lämplig mätteknik finns tillgänglig för högkvalitativ insamling av sådana mätdata som erfordras för att karakterisera den eller de bergvolymerna som kommer att undersökas inför anläggandet av SKBs djupförvar för använt kärnbränsle.

I de nedanstående delkapitlen presenteras kunskapsläge, erhållna resultat (1989–1992), kommande mål och program för FUD-verksamheterna som gäller grundvattenrörelser, bergets stabilitet, grundvattenmodeller och bergmekaniska modeller.

## 6.2 GRUNDVATTENRÖRELSE – KONCEPTUELL MODELLERING

### 6.2.1 Mål för verksamheten 1993–1998

Inom ramen för SKBs allmänna geovetenskapliga verksamhet när det gäller grundvattenhydraulik, skall huvudsakligen behandlas de regionala flödes- och transportvillkoren. Vidare behandlas fysikaliska och vissa kemiska processer som kopplas till det grundvattenhydrauliska systemet. För nuklidtransport och redoxrelaterade flödesproblem hänvisas generellt sett till SKBs FUD-program för kemi (kapitel 7) och Naturliga analogier (kapitel 8). Platsspecifik geovetenskaplig FUD med geohydrologi och grundvattentransport sker vid Äspölaboratoriet (se separat underlagsrapport). Hydrogeologiska undersökningsmetoder behandlas i kapitel 9, "Metoder och instrument".

Forskningen och utvecklingsarbetet för den konceptuella modelleringen relateras till följande förutsättningar. Grundvattenflödet är huvudsakligen laminärt och kan beskrivas med Darcys lag. Flödet sker till största delen i berggrundens spricksystem och de hydrauliska drivkrafterna på förvarsnivån styrs av gradienter i ett regionalt perspektiv. Genomsläpplighetsegenskaperna varierar inom vida gränser och är beroende av grundvattenkemi, bergmekaniska förhållanden och temperatur.

För perioden 1993–1998 är FUD-verksamhetens mål att:

- Vidareutveckla metoder för beskrivning av sprickors geometri och deras hydrauliska egenskaper.
- Vidareutveckla in situ-metoder för bestämning och analys av hydrauliska egenskaper i sprickigt berg.

- Utredda de hydrauliska egenskapernas storskaliga beroende av sprickmineraliseringar, bergspänningar och tidigare permafrostdjup.
- Utredda och sammanställa indirekta tecken på grundvattnets flödesmönster i sprickigt berg för såväl modellstrukturering som bekräftelse av modeller.
- Utredda risker för kortvariga tryckförändringar i grundvattenmagasinet på förvarsnivå pga jordbävningar.
- Beskriva förutsättningar för grundvattenflöde och transport vid ett djupförvar i ett regionalt perspektiv under dagens klimatsituation.
- Beskriva förutsättningarna för grundvattenflöde och transport vid ett djupförvar i ett regionalt perspektiv under glaciation och deglaciation.
- Vidareutveckla teorier för ”icke-reaktiv” flödestransport i sprickor och system av sprickor.
- Sammanställa och strukturera geostatistiska data som används vid säkerhetsanalys och byggarhetsbedömning.

### 6.2.2 Kunskapsläget

Under det senaste decenniet har teoretiska och experimentella studier bidragit till en successivt ökad förståelse av den heterogena flödesprocessen i bergets sprickor. Användning av geostatistiska metoder och fraktal karakterisering av hydrauliska konduktiviteten, spricklängder, sprickvidder liksom kunskapen om tvåfasflöde och flerporositetssystem har ökat. Geofysiska metoder har utvecklats till att bli värdefulla komplement till hydrauliska tester och därmed skapas bättre konceptuellt underlag i modellarbetet /6-1/. Större intresse ägnas kopplade processer till grundvattenflödet, dvs termo-hydro-mekaniska samband och vattenkemiska beroenden. I det följande kommenteras några projekt med inriktning på förståelse av flödesprocessen, vilka bedrivits av SKB under senare år. I övrigt hänvisas till årsredovisningarna och till TR-seriens rapporter.

Från flera undersökningar som studerat flödesgradienter runt en utsprängd tunnel tycks det som de hydrauliska konduktiviteterna minskar närmast tunnelväggen. Till att börja med ansågs resultaten förvånande eftersom man av sprängskadorna förväntade sig förhöjda permeabiliteter /6-2/. Emellertid är fenomenet nu välkänt och man har sökt förklaringen i spänningsomlagringar och kemiska utfällningar. Vidare finns en ytterligare förklaring, nämligen att konduktivitetsminskningen kan vara en fasgränsmekanism mellan luft eller annan gas och vatten. Processen skulle då regleras av ett tvåfasflöde. Preliminära teoretiska beräkningar visar att så kan vara fallet /6-3/ men ytterligare forskning krävs. För det vattenmättade tillståndet kan man dock förvänta sig konduktivitetshöjningar, speciellt i axiell led. Preliminära resultat för Stripa /6-4/ visar detta.

Bättre konceptuella underlag är eftersträvarvärda vid grundvatten- och transportmodellering i sprickigt berg. I vår kristallina berggrund är t ex rödfärgningar av fältspatkristaller vanliga i anslutning till sprickplan. Färgförändringen skulle kunna vara ett av flera tecken på tänkbara flödesvägar för hydrauliska modeller. Likaså visar preliminära resultat att, i de rödfärgade partierna på större djup, sorptionsmöjligheterna torde var mer utvecklade. Där är rödfärgningen orsakad av en hydrotermal process (påverkan av heta vattenlösningar), varvid plagioklasgittret vittrat. I proverna finns ofta lermineral. Vidare visar susceptibilitetsmätningar att magnetit omvandlats till hematit /6-5/.

När kärnbränsleavfall placeras i berget kan konvektionsströmmar uppträda i grundvattenmagasinet pga kapslarnas värmeutveckling. En intressant aspekt på sådant termiskt inducerat flöde är huruvida ett densitetsskiktat berggrundvatten kan balansera flödessystemet. T ex kan kapslar placeras i saltvattenmiljö som överlagras av en



sötvattenkudde. Med hjälp av en modifierad Hele-Shawcell har det varit möjligt att studera fenomenet och uppställa analytiska kriterier för detta hydrauliska system i laboratorieskala /6-6/.

Konceptualisering vid hydraulisk modellering omfattar trovärdiga randvillkor. De tredimensionella modellerna blir allt vanligare, vilket innebär att successivt mer komplicerade flödesgeometrier analyseras. Det största praktiska intresset vid grundvattenmodellering för ett förvar ägnas nivåer ca 500 m under markytan. Med hänsyn till klassisk grundvattenteori kan man förvänta sig att ett djupförvar flödesmässigt influeras av regionala grundvattensystem. Den lokala topografien vid ett förvarsområde har sannolikt mycket litet att göra med flödesregimen på själva förvarsnivån /6-7/. Flödet vid djupförvaret styrs snarare av regionala än lokala gradienter. Om det vore möjligt att med god noggrannhet mäta vertikala tryckvariationer vid modellränder till 1 km djup skulle troligen mer realistiska regionala flödesbeskrivningar erhållas jämfört med flöden utifrån topografiska data.

I det långa tidsperspektiv som förvarets säkerhet skall bedömas måste klimatförändringar med istidsscenarioer beaktas. I samband med en istid liknande den senaste som påverkat vårt land, sjunker havsnivån med storleksordningen 150 m. Under isens avsmältningsförlopp råder alltså andra randvillkor för förvaret än de vi kan uppskatta för dagens klimattillstånd /6-8, 6-9, 6-10, 6-11/. Ett grundläggande synsätt har arbetats fram av SKB i samarbete med TVO i Finland. Vid en regional modellering under ett deglaciationsförlopp måste, förutom till havsnivån, hänsyn tas till permafrostutbredning, islaster, dämnda issjöar, höjda vattentryck under isen och smältvattenproduktion.

Under det senaste decenniet har vissa standardiserade värderingssystem för klassificering av grundvattenmagasinens och grundvattenresursernas sårbarhet använts. Detta för att främst minska föroreningsrisken av ytliga grundvattenförekomster. Klassificeringssystemen har nu vidareutvecklats för att översiktligt kunna bedöma förvarsområden för radioaktivt avfall ur hydrogeologisk synvinkel. Eftersom kunskapen om olika platser i ett värderingsskede kan variera med hänsyn till olika långt gångna genomförda karteringar och förundersökningar är det väsentligt att osäkerheten för de hydrogeologiska parametrarna vägs in i bedömningarna /6-12/.

### **6.2.3 Program 1993–1998**

För att möta de mål som presenterats ovan skall SKB när det gäller det konceptuella synsättet på grundvattenströmning genomföra följande program.

När flödesprocessen skall beskrivas i sprickigt berg och då speciellt i diskreta sprickmodeller ansätts konduktivitet och kinematisk porositet. Dessa parametrar är beroende av sprickvidden som i sin tur beror av spänningstillståndet i berggrunden. Sambandet mellan mekanisk och ekvivalent hydraulisk sprickvidd är oklart när hydro-mekaniska beräkningar genomförs. Det finns ett behov av att bättre förstå de hydromekaniska processerna i bergmassan såväl i översiktlig som detaljerad skala. Sprickors och sprickkorsningars geometrier och hydrauliska karaktär behövs studeras. Detta skall främst ske med experiment i laboratorieskala. Forskningsuppgifterna omfattar bl a utredning av indata till beräkningsmodeller samt utveckling av mätmetoder för sprickkaraktärisering och porositet.

Utveckling av in situ-metoder för bestämning av genomsläpplighet och magasinrande egenskaper i sprickigt berg sker fortlöpande. Betydande insatser görs framför allt inom verksamheten för gas- och oljeprospektering. Analysmetodik har förbättrats genom Stripa- och Äspöprojekten, främst när det gäller interferenstester. Det finns likväl ett behov att öka förståelsen av in situ-metodernas beroende av skala, bergets

heterogenitet, mätningarnas riktning, vilken bergvolym som omfattas vid mätning etc. Detta utredningsarbete planeras i samband med Äspölaboratoriet och med programmet för Metod- och instrumentutveckling. Provpumpningar och hydraultestbestämningar av k-värden och kinematiska porositeter är av mycket stor betydelse vid detaljundersökningar i lokaliseringsprogrammet.

Det är väl känt att de hydrauliska egenskaperna i det kristallina bergets sprickor är relaterade till i vad mån mineraliseringar förekommer i sprickorna. Mineraliseringarna avspeglar den tektoniska historiken. Likaså förutsätts bergspänningssituationen påverka konduktiviteten. En ytterligare mekanism som skulle kunna inverka på den generella konduktivitetfördelningen mot djupet är tidigare permafrostutbredning. Återkommande glaciationer har inneburit frysning, upptining av spricksystemens vatteninnehåll ned till ca 500 m djup. Från detaljundersökningar är det känt att isbildning med efterföljande upptining givit ökad konduktivitet. Konduktivitetens generella beroende av dessa processer bör utredas vidare.

Det konceptuella synsättet av berggrundvattnets omsättning och flödesvägar kan delvis baseras på indirekta bedömningar. T ex kan höga salthalter i grundvattnet vara tecken på låg vattenomsättning. Syreisotopen,  $^{18}\text{O}$ , kan likaså ge upplysningar om regionala flödesmönster i ett långt tidsperspektiv. Mineraliseringar i spricksystem och geokemiska förändringar i och på sprickväggar kan vara indikationer på presumtiva flödesvägar. När hydrauliska modellstrukturer byggs upp är det av vikt att ta hänsyn till alla dessa kompletterande data som ger en kvalitativ bild av grundvattnets strömningsmönster. Det finns ett starkt behov av sammanställning av indirekta hydrauliska tecken för såväl modellstrukturering som modellvalidering.

Förvarets stabilitet mot seismiska störningar har tidigare utretts i ett flertal studier. Det är med hänsyn till dessa studier inte troligt att den mekaniska stabiliteten för förvaret störs av jordbävningar i vårt land med den förvarsutformning som valts. Dock har i mer jordbävningssensitiva områden på jordklotet iakttagits kortvariga störningar i den hydrologiska balansen i samband med jordbävningar. Beroende på vilken bergrörelse som sker kan antingen momentana hydrauliska trycksänkningar eller -höjningar erhållas. Dessa momentana tryckförändringar bör utredas med avseende på storlek, riktning, varaktighet, tektoniska processer och djup. Vidare bör beaktas i vad mån viskositetsförändringar i förvarets bentonitbuffert kan erhållas vid en kortvarig hydraulisk tryckförändring.

I avsnitt 6.2.2 "Kunskapsläget" kommenterades att den naturliga vattenomsättningen på förvarsnivån ej nödvändigtvis styrs av de lokala flödesgradienterna utan mer troligt regleras av de regionala topografiska förhållandena. Det bedöms som väsentligt att vidareutveckla regionala strömningsmodeller som belyser långsiktiga transienta förändringar. Speciellt gäller detta för kustnära förvar där de transienta flödesförändringarna kan påverkas av glaciation, deglaciation, landhöjning och salt/sötvatten-gränsen, vilket i sin tur ändrar beräkningsmodellens randvillkor. Som ett led i att förstå vattenomsättningen i ett regionalt perspektiv och på djup ned till 1 500 m planeras hösten 1992 borring av ett hål till detta djup inom Laxemarområdet nära Simpevarvshalvön, Oskarshamns kommun. Efter avslutad borring görs geofysiska, vattenkemiska, geokemiska och hydrauliska undersökningar i hålet.

Transportprocessen för grundvatten i berggrunden omfattar ett flertal fysikaliska och kemiska mekanismer. Substanser som transporteras kan påverkas av fysikaliska mekanismer som filtrering, hydrogeokemiska mekanismer som jonbyte (absorption-desorption), redoxreaktioner, utfällning-utlösning samt av radiologiska och biologiska effekter. Dessa processer med kommenterade forskningsbehov behandlas i kapitel 7. Om vattentransporten sker utan påverkan av dessa mekanismer är den icke-reaktiv och omfattar enbart vattentrogna substanser. Den icke-reaktiva transportprocessen

innehåller advektion (konvektion), molekylär diffusion och kinematisk dispersion. Advektionen sker med det fria vattnet i den tillgängliga kinematiska flödesporositeten. För lågpermeabla medier under vattenmättnad finns det i den internationella litteraturen indikationer att den kinematiska porositeten beror av den hydrauliska gradienten, men fenomenet är ej helt utrett. Den molekylära diffusionen innebär att ett ämne förflyttas från områden med höga koncentrationer till områden med låga koncentrationer. Den kinematiska dispersionen är ett "blandningsfenomen" som beror av hastighetsskillnader för flödet i en spricka liksom av hastighetsskillnader mellan olika sprickor. Flödet blandas genom sprickor som korsar varandra och successivt erhålls förändringar av substansernas koncentrationer i tid och rum. Man har funnit att den klassiska dispersionsekvationen enbart tycks vara giltig efter långa flödestider och för stora avstånd från utsläppspunkten. Dispersionen vid momentana utsläpp styrs exempelvis troligen av tidsberoende dispersionskoefficienter och ej av någon skaleffekt i rummet /6-15/. Kanalströmningsteorin med matrixdiffusionseffekter har generellt sett ökat kunskaperna om transportprocessen /6-16/, men det finns behov av teoretisk och praktiskt inriktad vidareutveckling. En bättre kunskap om berggrundens hydrauliska heterogenitet och porstruktur är därvid viktiga förutsättningar för att kunna prognosticera såväl icke-reaktiv som reaktiv transport.

I en säkerhets- och byggbarhetsanalys ingår ett flertal hydrogeologiskt relaterade parametrar när berggrunden beskrivs och modelleras. Några av dessa parametrar som används kan mätas i fält, medan andra baseras på laboratorie- eller beräkningsmässiga grunder. Säkerhetsanalysen, typ SKB 91, är stokastisk och således behandlas bergmediets egenskaper som statistiska. Grundvattenmodeller har ofta, och bergmekaniska modeller förväntas utvecklas mot, en statistisk inriktning. Vid en lokaliseringprocess ökar omfattningen av undersökningsdata fortlöpande och successivt ökar den plats-specifika förståelsen av förvarets omgivning, dvs geobarriären. En systematisk geostatistisk behandling av data syns nödvändig och den bör gälla såväl fältdata som andra experimentella data, vilka används när säkerhet och byggbarhet bedöms. Inom ramen för "Geovetenskap" skall statistiska teorier behandlas, t ex prognosmetoder och multivariatanalys. Vidare bör olika geodatas statistiska egenskaper sammanställas, vilka ingår i säkerhetsanalys och byggbarhetsanalys. Ovanstående delprogram har bäring på projektet "Bergvolymbeskrivning" inom Äspölaboratoriet och skall ligga till grund för datahantering och analys vid lokaliseringsprogrammets kandidatplatser.

## **6.3 BERGGRUNDENS STABILITET**

### **6.3.1 Mål för verksamheten 1993–1998**

Platsspecifika bergmekaniska frågeställningar vid en förvarsanläggning behandlas främst inom Äspöprojektet. Inom SKBs övriga allmänna geovetenskapliga verksamhet ingår mer grundläggande hållfasthetstekniska aktiviteter samt tektoniska bedömningar.

Det övergripande syftet är att kvantifiera och utreda konsekvenserna av jordbävningar och glaciationer med påföljande landhöjning. Därför sammanställs befintlig kunskap och vidareutvecklas förståelsen om de geodynamiska processerna i den Baltiska skölden.

För perioden 1993–1998 är verksamhetens mål att:

- Genomföra en seismotektonisk sammanställning över Baltiska urbergsskölden.
- Genomföra en pedagogisk sammanställning som visar den sprödttektoniska historien i Baltiska urbergsskölden med de lastsituationer som ägt rum.

- Detaljstudera och kartlägga landhöjningen i olika regioner av Sverige.
- Genomföra detaljstudier av tidigare strandlinjer i några regioner av Sverige för att klarlägga eventuell postglacial tektonik.
- Öka kunskapen om den kristallina berggrundens sprödtektoniska fragmentering.
- Vidareutveckla dateringsmetoder av sprickzonsrörelser.
- Öka förståelsen av bergspänningsmätningars representativitet.

### 6.3.2 Kunskapsläget

#### Allmänt om tektonik och seismisk aktivitet

Tektonik är ett samlingsbegrepp för jordskorpan deformation och de strukturella former som då uppkommer. Begreppet omfattar deformations- och strukturformer från millimeter till kilometerskala.

Här ges en kortfattad resumé över de studier som genomförts vid SKB 1989–1992. I övrigt hänvisas till SKBs årsrapporter /6-13, 6-14/ och redovisningar i TR-serien.

Den sprödtektoniska utvecklingen av Baltiska skölden är väsentlig att förstå för att kunna beskriva vår berggrunds spricksystem och tidigare rörelser. De spänningssituationer som uppkommit under kontinentaldriften, ”paleostressfältet”, kan översiktligt analyseras med hjälp av olika typer av gångbergarters förekomst, spricklänningar, sprickmineral etc och relateras till olika tidsperioder. Vidare är det möjligt att utifrån isotopdata indikera tidigare vertikala laster från sedimentära lager som eroderat bort. Successiva glaciationer har också påverkat lastsituationen i vårt urberg. Vår berggrund har alltså med stor sannolikhet blivit utsatt för krafter i alla riktningar. Under nuvarande tektoniska regim, med spridning från mittatlantiska ryggen, finns därför inga tecken på att nya sprickor eller zoner skall uppträda i den övre delen av krustan i Sverige. Om rörelser sker i jordskorpan i vårt land äger de således rum som reaktiveringar och då i redan befintliga svaghetszoner eller sprickor. En sammanställning av södra Sveriges sprödtektonik presenteras i /6-28/. Flera andra regionala studier visar liknande resultat med rörelseaktivering /6-29/, /6-30/, /6-31/.

Sydöstra Sverige utgör en stabil berggrundsgeologisk miljö. En detaljerad sprickkartering av de ordoviciska kalkstenarna på norra Öland har gett en förståelse för hur vanliga rörelser är och med vilka storleksordningar de förekommit. Rörelserna i kalkstenen på Öland måste ha ägt rum senare än för 450 miljoner år sedan. 90% av alla sprickor visar inga rörelser. 10% av sprickorna visar alltså förskjutningar och det maximala rörelsebeloppet har uppmätts till 5 cm /6-31/.

Den seismiska aktiviteten i den Baltiska urbergsskölden styrs huvudsakligen av de plattetektoniska processerna och pågående landhöjning. Genomförda seismiska mätningar /6-43, 44, 45/ visar att merparten av den spänning som utlöser jordskalv har en kompressionsriktning i N60W, vilket är ungefärligen vinkelrätt mot kontinentalrörelsen från mittatlantiska ryggen. Den världsomspännande databasen ”World Stress Map Project” visar också en relativt god överensstämmelse mellan jordskorpan plattetektonik och största horisontella huvudspänningar, dvs kompressioner. I den Baltiska skölden uppträder vissa avvikelser i spänningsfältet vilket kan förklaras som effekter av glaciations-landhöjningsprocesserna /6-46/.

Om deglaciationen är relativt snabb utsätts jordskorpan för regionala spänningsskillnader som kan utlösa rörelser i redan befintliga svaghetsstrukturer. Avsmältningsskedet vid den senaste nedisningen var påtagligt snabbare i norra Sverige jämfört med situationen i södra delarna av vårt land. Detta anses vara en viktig orsak till de neotektoniska och postglaciala rörelser som tolkats i t ex Lansjärvsområdet /6-46/.

### Glaciationsscenario

SKB och Teollisuuden Voima OY (TVO) i Finland, har under 1990–1991 gemensamt inventerat det internationella kunskapsläget beträffande istider. Syftet har varit att beskriva när framtida istider kan förväntas och vilka förändringar i geosfären som inträffar i samband med dessa /6-8/, /6-32/, /6-33/.

I början av detta århundrade framlade jugoslaven Milankovitch en teori om att de variationer som finns i jordens bana kring solen och i jordaxelns lutning orsakar skillnader i instrålning till jorden som i sin tur orsakar istider. Dessa astronomiska variationer är cykliska med perioder på 23 000, 41 000 och 100 000 år. Genom att addera inflytandet på instrålningen från samtliga dessa variationer kunde han urskilja längre tidsperioder med lägre instrålning som han föreslog kunde representera istider. I brist på detaljerade data beträffande gångna tiders klimatvariationer var denna teori under en lång tid inte möjligt att bevisa eller avfärda.

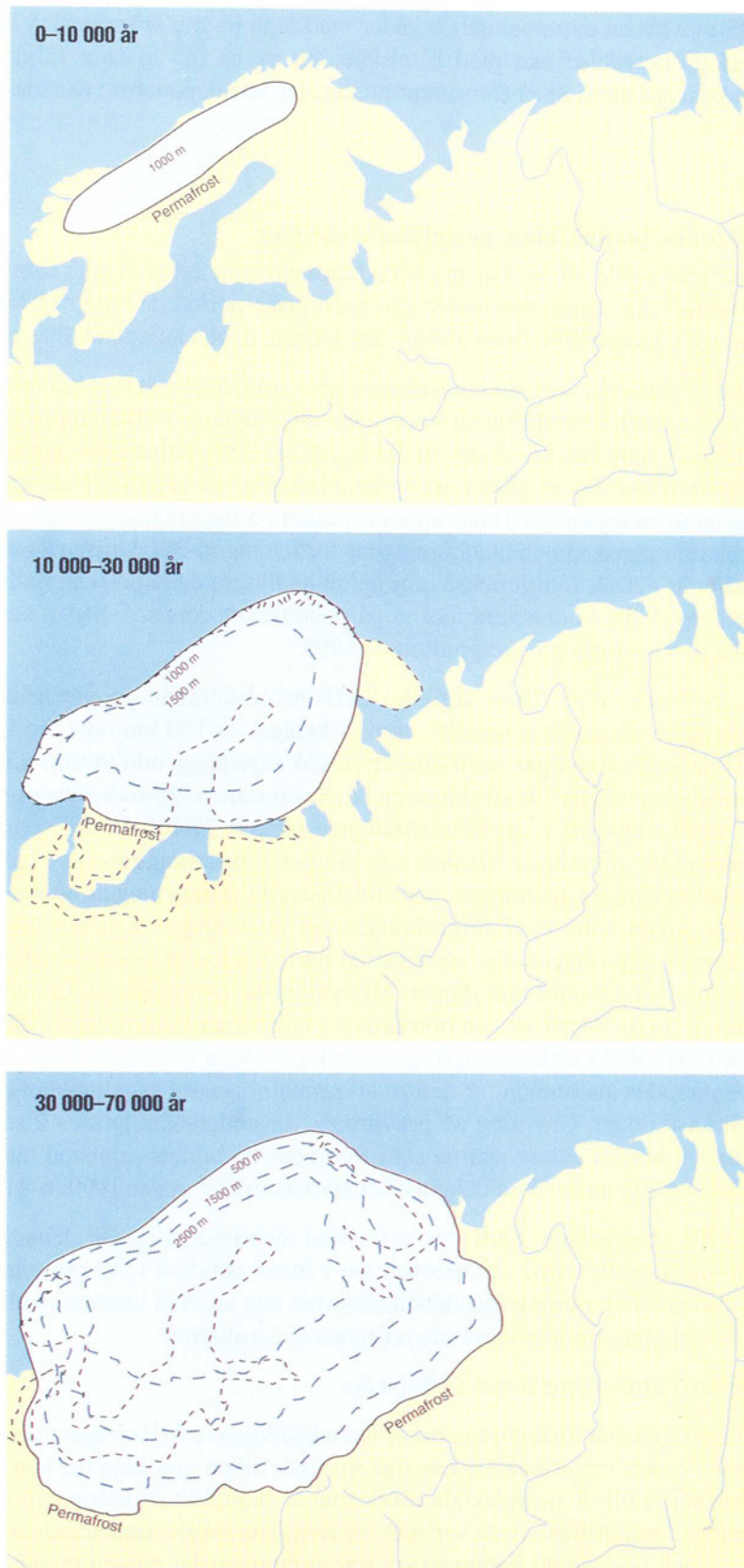
Under de senaste 20 åren har dock en stor mängd detaljerade data samtals in som starkt stöder Milankovitch teori. Dessa data kommer bl a från iskärnor som har tagits från Antarktis och Grönlands istäcken, men det är främst genom studier av borrhärdar från djuphavsbottenarna som en detaljerad och kontinuerlig beskrivning av klimatförhållanden under hundratusentals år har erhållits. Genom att bl a analysera syreisotopförhållanden i skal av foraminiferer i dessa borrhärdar har man kunnat visa att det har varit regelbundet återkommande istider under de senaste 750 000 åren som helt följer Milankovitchcyklerna.

Man kan därför använda cyklerna till att prognostisera när framtida istider kommer att uppträda och hur stora de kommer att bli. Detta förutsätter emellertid att människan inte förändrar atmosfärens sammansättning eller cirkulation på något avgörande sätt. Växthuseffekten kan vara en sådan förändring. Flera forskare anser dock att sett i tiotusenårsperspektivet innebär denna effekt, om den existerar, att den nuvarande värmeperioden enbart kommer att förlängas några hundratal eller tusentals år. I ett längre tidsperspektiv kommer förmodligen klimatvariationerna att åter följa cyklerna.

Det finns flera klimatmodeller som bygger på Milankovitch cykler, oftast kalibrerade med kända klimatdata från tidigare glaciationsperioder. Dessa modeller medger alltså även prognoser för det framtida klimatet. För SKB/TVOs istidsscenario har vi valt att använda ACLIN och Imbrie & Imbries modeller /6-34/, /6-35/. Båda dessa modeller visar att den värmeperiod vi har upplevt efter senaste istiden har varit ovanligt varm. Nästa gång en liknande värmetid inträffar blir om 120 000 år. En period med ett tempererat klimat kan dock förväntas om 75 000 år. Eftersom detta är den första tidpunkt då människan, efter en lång period av istider, återigen kan bosätta sig i Skandinavien är också detta den tidpunkt som SKB/TVOs istidsscenario sträcker sig till. Scenariot beskriver klimatförhållanden för Skandinavien som helhet, samt specifikt för regionen Stockholm-Helsingfors. När framtida istider kan förväntas och inlandsisarnas utsträckningar och tjocklekar under dessa tider redovisas i Figur 6-2.

En vidareutveckling av dynamiken i ett framtida glaciationsscenario har skett i och med att en tidsberoende modell över nedisningen i Skandinavium tagits fram. Modellen har kalibrerats med vår kunskap om Weichselglaciationen och då med avseende på moränstrukturer, jordmäktigheter, erosionsspår etc. /6-36/.

Utifrån framtida glaciationsscenarioer kan påverkan på ett förvar bedömas med olika typer av beräkningsmodeller. Inledningsvis har stabiliteten inom ett förvarsområde analyserats med hänsyn till en islast och samtidigt vattentryck. En sensitivitetsstudie har också utförts. Arbetet har exemplifierats med data från typområdet Finnsjön. Sammanfattningsvis säger resultaten att rörelserna tas upp i redan befintliga zoner. De maximala relativa rörelsebeloppen i en zon inom området uppgår vid normalfallet till



**Figur 6-2.** Utsträckning av framtida inlandsisar enligt SKB/TVOs istidsscenario.

ca 0,05 m. Om en extremsituation råder med låga in-situ spänningar i berget skulle portryckets betydelse öka med rörelsebelopp av ca 0,5 m som följd. Nuvarande förvarskoncept inom SKB förutsätter att kapslar inte deponeras i sådana zoner /6-37, 6-38/.

### **Neotektonik, landhöjning, postglaciala rörelser**

Med neotektoniska rörelser menas förskjutningar som ägt eller äger rum under nuvarande tektoniska regim, dvs under den geologiska period då Atlanten funnits (ca 60 miljoner år). Eventuella rörelser efter den senaste deglaciationen kallas postglaciala.

Landhöjningen efter senaste nedisningen har vanligen studerats i relation till havsnivån. Det är emellertid möjligt att studera landhöjningens rörelsebelopp och fördelning med hjälp av långsträckta sjöars stjälpning under "återfjädringen". Genom att datera sedimentationsnivåer på olika djup är det möjligt att analysera den generella landhöjningen inom en region. SKB har initierat studier på flera platser i landet för att erhålla en förbättrad kunskap och landhöjningens fördelning /6-39/. Utifrån kvartärgeologiska studier är det för övrigt också möjligt att analysera eventuella strandlinjeförskjutningar som skulle kunna vara tecken på postglaciala rörelser. Sådana studier pågår i Värmland och väntas bli avrapporterade 1993.

Under perioden 1986–1988, utförde SKB ett omfattande geovetenskapligt forskningsprogram i Lansjärvsområdet, som är beläget ca 150 km norr om Luleå. Syftet med dessa undersökningar var främst att försöka kartlägga omfattning och karaktär av de förmodade postglaciala strukturerna i detta område. 1989 redovisades resultaten av dessa undersökningar i en sammanfattande rapport /6-40/. Under sommaren 1990 koncentrerades fältarbetet till den s k Molbergsförkastningen, se Figur 6-3. Efter refraktionsseismiska mätningar, som lokaliserade förkastningen, grävdes två breda parallella diken tvärs över förkastningen för att möjliggöra detaljerade studier av såväl berg som jordlager. Tre kärnborrhål borrades för att undersöka förkastningens orientering och karaktär mot djupet. Mineralogiska och geokemiska undersökningar utfördes av bergartsprover och borrhåll i och i nära anslutning till förkastningen. Strukturerna i de kvartära avlagringarna dokumenterades i detalj. I två hammarborrhål installerades instrument för deformationsmätningar av eventuella pågående rörelser i förkastningen. Grävning av provgropar för undersökning av s k seismiter, dvs strukturer i de lösa avlagringarna som förmodas ha bildats samband med jordskalv, har också utförts inom vissa delar av Lansjärvsområdet under 1990 /6-41/.

I juni 1991 arrangerade SKB en exkursion med internationellt deltagande i Lansjärvsområdet. Syftet med exkursionen var i första hand att i fält presentera de viktigaste resultaten av Lansjärvsundersökningarna och att med internationell och svensk expertis diskutera problem rörande postglaciala strukturer.

Slutsatserna efter exkursionen är följande:

- De postglaciala förkastningarna är huvudsakligen reaktiveringar av äldre dominerande zoner, men förekomst av nya sprickor till en viss liten del kan ej uteslutas.
- Orsakerna till de postglaciala rörelserna är sannolikt en kombination av relativt snabba förändringar av de vertikala lasterna (jordskalv associerade med deglaciation) och horisontell kompression från mittatlantiska ryggen relaterad till kontinentaldriften. Jordskred och seismiter är tydliga indikationer på kortvarig instabilitet.
- Idag finns inga klara belegg för att de postglaciala förkastningarna fortfarande är aktiva. Dessa förkastningsrörelser är alltså troligen orsakade av specifika påkänningar i samband med glaciation och isavsmältning och har liten eller ingen koppling till nuvarande spänningssituation i norra Sverige.



*Figur 6-3. Fältarbete för kartläggning av Molbergförkastningen.*

### **Tektonisk analys och tolkningsmetodik**

Berggrundens strukturer i regionala skalor (km-skala) tolkas vanligen i satellit- eller flygbilder. För mer detaljerade beskrivningar används topografiska kartor eller mätningar på hållar där berget går i dagen. Lineamentstudier, zon- och sprickkarteringar kompletteras ofta med geofysiska mätningar. Historiskt sett har troligtvis tolknings-skalan influerat den konceptuella bilden av bergets strukturer, dvs man har erhållit resultat som i överdriven grad är avhängiga den skala vid vilken man betraktat problemet. På senare år har allt större intresse ägnats användningen av fraktalbegreppet för att beskriva topografiska reliefer och geologiska strukturer i naturen /6-47/. Flera studier pekar på att likartade sprödtektoniska strukturer återfinns i olika skalor /6-22/. Den fraktala dimensionen är ett indirekt mått på hur väl sprickor och zoner med olika riktning och utsträckning uppfyller bergmassan. I exempelvis diskreta sprickmodeller för grundvattenhydrauliska beräkningar används fraktalbegreppet för att beskriva det konduktiva nätverket.

Eftersom de mest sannolika rörelserna sker genom reaktivering av befintliga zoner och sprickor är det väsentligt att få ett geologiskt perspektiv på när de senaste spänningsomlagringarna har ägt rum inom en förvarsplats. Inom det tektoniska arbetsfältet förekommer olika tekniker för åldersdatering av sprickzoners senaste rörelse. SKB har finansierat en jämförande studie där fyllnadsmaterial från en sprickzon vid Äspö har analyserats med olika tekniker. De metoder som användes var palaeomagnetism, mikrostrukturell analys, ESR (elektronspinresistans) och isotopteknikerna K-Ar, Rb-Sr. Metoderna visar relativt god samstämmighet men ytterligare utvecklingsarbete syns nödvändigt /6-48/.



### 6.3.3 Program 1993–1998

För att möta de formulerade målen i avsnitt 6.3.1 föreslås följande program för 1993–1998.

Under kommande forskningsperiod planeras en sammanställning av de huvudsakliga lastriktningar som påverkat den Baltiska urbergsskölden under dess historiskt sett sprödetektoniska skede. I regionala perspektiv bearbetas gångbergarters riktningar, tidigare sedimentindikationer, erosionsspår, sprickmineraliseringar etc. Vidare skall de recenta plattetektoniska processerna och glaciationerna ge underlagsmaterial till en sådan sammanställning. Det övergripande syftet är att pröva hypotesen att Baltiska skölden blivit utsatt för alla tänkbara spänningsriktningar. Ett sådant förhållande skulle innebära att nya sprickor ej torde bildas i den övre delen av krustan under nuvarande tektoniska regim. Det är därvid väsentligt att studera hur och varför horisontella zoner uppträder. Vattenförande, horisontella zoner kan verka som hydrauliska barriärer i förvarsområdet. I samband med utvecklingen av denna konceptuella bild kan storskaliga bergmekaniska beräkningar komma att genomföras varvid lasterna varieras till storlek och riktning.

Ett flertal sentida studier belyser de, jämfört med omvärlden, mycket stabila seismiska förhållanden som råder i Sverige. Det finns likväl ett behov att sammanställa olika nordiska studier till ett gemensamt dokument, där riskerna för jordskalv diskuteras och värderas. För denna sammanställning planeras ett samarbete mellan TVO och SKB (jfr det gemensamma istidsscenarioet).

De mer platsspecifika reaktionerna på en nedisning vid en förvarsplats bearbetas vidare. I nedanstående avsnitt 6.4 beskrivs aktiviteter med numerisk modellering. Men även den konceptuella förståelsen behöver vidareutvecklas utifrån TVOs och SKBs gemensamma glaciationsöversikt. Exempel på arbetsinsatser gäller spänningsomlagringens påverkan på konduktivitetssfältet, permafrostens effekter, utfrysning av salt vatten och transient lastförändring under deglaciation. Landhöjningens mekanismer utreds vidare genom studier av sedimentationsnivåer i ett antal sjöar, dvs med s k sjöstjälpningsmetodik. Övriga kvartärgeologiska insatser ägnas eventuella strandförskjutningar för att utröna om postglaciala rörelser ägt rum. Arbeten pågår för närvarande i Värmland.

Oberoende iakttagelser runt om i världen vittnar om att sprickor och sprickzoner, alltifrån detaljskala till det regionala perspektivet, förekommer med diskreta riktningsskoncentrationer. Vissa forskare gör en indelning i olika ordningar av sprickor/zoner medan andra talar om kontinuerliga, skaloberoende fragmenteringsprocesser. Det finns härvid ett behov av att utreda om det s k fraktala synsättet underlättar tolkning och förståelse av olika bergartsstrukturer.

En fortsatt kunskapsuppbyggnad bör ske av de olika metoder som används för åldersbestämningar av senaste rörelser i sprickzoner. Förutom olika isotoptekniker kommer ESR-teknik och paleomagnetiska metoder att tillämpas. De lämpligaste metoderna används sedan vid detaljundersökningar inom lokaliseringsprogrammet.

Berggrundens spänningssituation vid ett förvar är väsentlig att känna till ur funktionsmässig och anläggningsteknisk synvinkel. Vidare spelar bergspänningsförhållandena en viktig roll i den generella tektoniska förståelsen inom en region. Följande mätprinciper är vanligen förekommande:

- In situ-mätning i borrhål.
- Fokalplansanalys av jordskalv.
- Bergutfall i borrhål.
- Mikroseismisk registrering.

De vanligaste in situ-metoderna i Sverige är sk överborrningsteknik (overcoring) och hydraulisk spräckning. Med hänsyn till de slutsatser som ofta dras av bergspänningsmätningar är det väsentligt att utreda osäkerheterna i respektive metod, t ex när det gäller volymsrepresentativitet och påverkan av mikrostrukturer. Förutom den metodinriktade verksamheten finns behov av ökad förståelse för om tidsberoende eller bergartsberoende spänningsfördelningar förekommer. Vidare är det av intresse att bedöma fjällkedjans regionala inverkan samt huruvida de successiva glaciationerna givit residuala spänningsmönster, som är signifikanta.

## **6.4 GEOHYDROLOGISKA OCH BERGMKANISKA BERÄKNINGSMODELLER**

### **6.4.1 Mål för verksamheten 1993–1998**

Beräkningsmodeller utvecklas främst inom ramen för Äspölaboratoriets aktiviteter. Kompletterande insatser skall ske inom SKBs allmänna FUD-verksamhet. När det gäller matematiska modeller inom "Geovetenskap" är FUD-verksamhetens mål för perioden 1993–1998 att:

- Vidareutveckla hur resultat från hydraultesters volymsrepresentativitet och dimensionalitet skall inordnas i en modellstruktur.
- Integrera och ta hänsyn till allmän geologisk och geofysisk information i konduktivitetsfördelningen för en platsspecifik stokastisk grundvattenmodellering (indikatorsimulering).
- Utveckla en regional flödesmodell för förhållanden vid glaciation och deglaciation.
- Vidareutveckla modeller för konvektionsmodellering i sprickigt berg.
- Vidareutveckla bergmekaniska stokastiska modeller samt vidareutveckla skalberoendet inom bergmekaniska modellstrukturer.
- Vidareutveckla kopplade hydro-termo-mekaniska modeller.

### **6.4.2 Kunskapsläget**

Matematiska modeller för grundvattenströmning och bergmekanik utgör viktiga verktyg i arbetet med avfallsdeponeringen. I takt med datorernas alltmer ökade beräkningskapacitet utvecklas numeriska och stokastiska modeller vid sidan av empiriska samband och rent analytiska ekvationslösningar. En beräkningsmodell används för att

- öka förståelsen av ett vetenskapligt problem,
- analysera vilka parametrar som är väsentliga för att lösa ett beräkningsproblem vid givna förutsättningar,
- göra prognoser i tid och rum.

Fördelarna med numeriska modeller är att

- de är flexibla och kraftfulla,
- räkneoperationerna är korrekta,
- resultaten kan enkelt visualiseras och redovisas i bra pedagogisk form.

Berggrunden är till sina ingående delar deterministisk, dvs den existerar och har till synes mätbara, förutsägbara egenskaper och strukturer i alla skalor. Berggrundens komplexa struktur och stora variabilitet innebär dock att det är omöjligt att lita enbart till observationer av data vid en detaljerad kvantitativ beskrivning. Tidigare erfarenheter och kunskap samt statistisk bearbetning av mätdata för därför in en stokastisk

komponent i beskrivningen. Dessa förhållanden har lett till att såväl deterministiska som stokastiska beräkningsmodeller (och algoritmer) används i geovetenskapliga sammanhang.

I kapitel 2 avhandlas den integrerade modellkedjan för närzon och fjärrzon som används inom en säkerhetsanalys. I det följande kommenteras mer allmänt kunskapsläget för flödes- och transportmodellering (icke-reaktiv). Vidare kommenteras bergmekanisk modellering och lösning av kopplade problem.

### Grundvattenmodellering

SKB har på olika vis bidragit till modellutvecklingen. På senare år har insatserna koncentrerats till nödvändiga beräkningsverktyg vid säkerhetsanalyser (SKB 91), vid Äspölaboratoriet och vid Stripaprojektet. Den huvudsakliga modellutvecklingen kommer fortsättningsvis att ske i anslutning till Äspöprojektet, se separat underlagsrapport, /6-17, 6-18/.

Det hittills vanligaste angreppssättet för att i större skala beskriva grundvattenflöde i berg, har varit att anse berggrunden som ett **ekvivalent homogent poröst medium**. Hänsyn till bergets heterogenitet med denna modelleringsteknik kan tas med hjälp av anisotropi i konduktivitetstensorn eller med hjälp av storskaliga zoner som också hanteras som ekvivalenta porösa medier.

Eftersom vi från mätningar vet att berggrundens egenskaper är mycket varierande kan ovanstående modellansats ifrågasättas. Variationerna i berget kan hanteras med ett statistiskt synsätt genom att beskriva mediet som ett **heterogent poröst medium**. Härvid beaktas exempelvis de hydrauliska konduktiviteterna som slumpmässiga variabler med en viss fördelning i rummet (stokastisk kontinuum-modell).

Större hänsyn till bergets platsspecifika strukturer tas vid modellering med **diskreta spricknätverk**. Utifrån sprickmätningar och sprickornas statistiska fördelningar byggs modellstrukturen upp med konduktivitetsdata /6-19/ (stokastisk diskret spricknätverk-modell).

För att vid modellstrukturen beakta indirekta kvalitativa hydrogeologiska data pågår utvecklingsarbete med s k **icke-parametrisk indikatorsimulering**. Geologiska och geofysiska data kan därvid på ett systematiskt sätt komplettera "hårda" konduktivitets- och porositetsdata och ge mer realistiska modellutsagor /6-20/.

De flesta flödesteorier bygger på att det studerade mediet för en viss skala kan anses som statistiskt homogent. Emellertid visar pågående forskning att heterogeniteten ofta har ett fraktalt utseende, dvs den har ett mönster som är oberoende av observationsskala. Vidare visar sig flödesdimensionaliteten ej vara strikt 1-, 2- eller 3-dimensionell utan kan uttryckas som mellanformer. Man kan förvänta sig att **fraktal modellering av flöde och transport** blir ett allt vanligare verktyg för att analysera och beräkna komplicerade geometrier /6-21, 6-22/.

### Bergmekanisk modellering

Beräkningsmodellerna för bergets mekaniska egenskaper, dvs hållfasthet och deformation, kan i princip delas in i två huvudgrupper:

- Kontinuummodeller.
- Diskontinuummodeller.

Kontinuummodellerna beskriver berget som en enhetlig bergmassa där man inkluderar effekterna av diskontinuiteter utan att kunna definiera dem speciellt. Rörelser i berget beskrivs i dessa modeller genom kontinuummekanik, vilket innebär att det är svårt att beakta rörelser längs diskontinuiteter. Kontinuummodellerna kan vara av

differentiell eller integrerad typ. Finita element (FEM) och finita differenser (FDM) är exempel på differentiella metoder medan s k "Boundary Element Methods" (BEM) är exempel på integralmetoder.

I diskontinuummodeller beskrivs bergmassan med en kopplad modell mellan det intakta berget och de diskontinuiteter i form av sprickor, zoner som uppträder. Dessa modeller kan beskriva rörelser i berget med deformationsmekanismer för glidning längs sprickplan, separation av sprickplan och rotation av bergblock. Distinkta elementmetoder (DEM) simulerar bergmassan som ett diskontinuum och de kan exempelvis användas för att beräkna icke-linjära materialbeteenden samt stora deformationer vilka kan leda till kollaps /6-23/.

#### **Kopplade modeller**

Ett djupförvar för radioaktivt avfall kan påverka bergmassan via kemiska reaktioner eller via termiska, hydrologiska och mekaniska processer. Dessa processer påverkar varandra ömsesidigt i mer eller mindre utsträckning. Under senare år har intresset ökat för att utveckla s k kopplade modeller. Detta för att med större realism kunna beskriva förhållandena speciellt i närzonen /6-24, 6-25/. För de komplexa samband som skall beskrivas i de kopplade processerna kan analytiska beräkningsmetoder mycket sällan tillämpas /6-26/. Utvecklingen går mot tillämpning av numeriska metoder, vilka kräver omfattande verifiering. I det av SKI initierade s k DECOVALEX-projektet (international co-operative project for the DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments in nuclear waste isolation) sker utveckling och verifiering av kopplade termo-hydro-mekaniska modeller /6-27/.

#### **6.4.4 Program 1993–1998**

För att möta de mål som ställts upp när det gäller modellutveckling under perioden 1993-1998 skall följande program genomföras inom ramen för "Geovetenskap".

I avsnitt 6.2.3 kommenterades behovet av vidareutveckling av in situ-bestämningar av konduktivitet och porositet. En bättre förståelse av injektionstesternas volymsrepresentativitet och dimensionalitet är t ex önskvärd. En sådan förståelse innebär samtidigt att hanteringen av indata i såväl stokastisk kontinuum- som diskret nätverksmodellering behöver utvecklas eftersom elementstorleken och diskretiseringen påverkas i modellstrukturen. Man kan förutspå en ökad användning av interferenstester i framtiden vid en förundersökning. Idag kopplas interferenstestens resultat till diskreta vattenförande strukturer men det finns också ett behov av att se hur dessa pumprresultat kan inordnas i den stokastiska simuleringen.

Preliminära resultat visar på en större realism om hydrauliska (hårda) indata kompletteras med geovetenskaplig (mjuk) information. Denna information kan vara av geologisk och geofysisk karaktär och representera större eller mindre bergvolymmer än de volymer som hänför sig till konduktivitets- och porositetsdata. Den strikta integrationen mellan hårda och mjuka data behöver vidareutvecklas vid s k indikatorsimulering.

Förutom regional grundvattenmodellering under dagens klimatsituation är det väsentligt att belysa de hydrauliska villkoren i samband med framtida glaciationer och deglaciationer. Under föregående treårsprogram utvecklades en tidsberoende glaciationsmodell över Skandinavien /6-11/ med ett stokastiskt synsätt för de kommande 120 000 åren. Modellen ger prognoser för randvillkoren vid markytan när det gäller vertikala laster, skjuvpåkänningar och grundvattenbildning. Randvillkoren gäller för isavsmältning och permafrostsituation. Efter detta inledande arbete är avsikten att simulera regionala framtida flödessituationer. Inledningsvis sker detta längs en nord-

västligt riktad travers genom södra Sverige. Viktiga databaser vid detta arbete kommer bli vara tillgänglig vattenkemi på 500–1 000 m djup, brunnsarkivets information vid SGU och höjddatabasen vid Lantmäteriverket. På sikt är målet att modellen skall kunna beakta tidsberoende grundvattenbildning, tidsberoende havsvattenfluktuationer, densitets- och temperaturförändringar i grundvattnet, effekten av grundvattenkemi, influenser av gasgenerering, influenser av permafrost, influenser av horisontella konduktiva zoner och konduktivitetens beroende av islast.

Hög salthalt i berggrundvattnet tyder på låg vattenomsättning. Pga förvarets värmeutveckling kan emellertid konvektionsflöden erhållas. Preliminära laboratoriestudier och modellberäkningar visar att en stabilitetsfront dock kan uppnås med densitetsskillnaderna i grundvattnet. Grundvatten från ett visst djup skulle således icke kunna nå biosfären. Modellverktyg som tar större hänsyn bergets heterogenitet och grundvattnets kemiska variationer behöver utvecklas för att bedöma konvektionsflödernas villkor.

Inom den bergmekaniska modelleringstekniken nyttjas främst ett deterministiskt synsätt med relativt få indata från direkta fältmätningar. Jämfört med t ex grundvattenmodeller, används stokastiskt synsätt sällan inom bergmekaniken. Konsekvenserna av ändrade förutsättningar i ett bergmekaniskt beräkningsproblem belyses oftast med sensitivitetstester. SKB avser att särskilt följa utvecklingen av sådana bergmekaniska modeller där större hänsyn tas till skalberoende och statistisk fördelning av ingående parametrar.

Utveckling av modellverktyg för de kopplade fysikaliska processerna i berggrunden pågår för närvarande i ett brett perspektiv. Laborativ verksamhet kommer att äga rum i Äspölaboratoriet medan teoretisk modellutveckling sker inom övrig FUD-verksamhet. SKB fortsätter att engagera sig i validering och verifiering av termo-hydro-mekaniska modeller, t ex inom ramen för det sk DECOVALEX-projektet.

## 6.5 ALTERNATIVA SLUTFÖRVARSMETODER

Huvudinriktningen på arbetet rörande slutförvaring i alla länder är förvaring i berg på 300 å 1000 meters djup. Alternativ som tilldrar sig intresse är förvaring under havsbotten och förvaring i mycket djupa borrhål. Båda dessa metoder försvårar återtagbarhet och framtida, korrigerande, åtgärder. Hittills genomförda analyser visar emellertid på en betydande potential till säker slutförvaring där den geologiska barriären ensam ger tillräcklig isolering av de radioaktiva ämnena. Ingendera metoden är ännu mogen för tillämpning eller demonstration. De internationella studierna har främst gällt deponering på mycket stora djup under oceanerna. Det kräver internationell samverkan och för närvarande är strävan snarast att förbjuda sådan deponering. I Sverige har också diskuterats deponering i urberget under Östersjön. Djuphavsdeponering kan knappast bli aktuellt för svenskt vidkommande.

För att genomföra deponering i mycket djupa borrhål krävs ytterligare teknisk utveckling men framför allt ökade kunskaper (data) om bergets egenskaper på flera km djup. Betydande forskning på detta område pågår utan direkt anknytning till kärnavfallsförvaring. Resultaten kan vara av intresse inte enbart för djuphålsförvaring utan även för allmän förståelse av geologin i regional skala. En begränsad uppföljning från svensk sida av den pågående forskningen på området är därför motiverad. Insatserna sker lämpligen i form av t ex doktorandarbeten vid någon högskola. De kontakter som på detta område etablerats med ryska forskare är också intressant att upprätthålla, eftersom en betydande del av den vetenskapliga insatsen hittills skett i Ryssland.

## 7 KEMI

### 7.1 GRUNDVATTEN OCH GEOKEMI

Under den kommande perioden fortsätter klassificeringen av grundvattenkemidata, bestämning av sorptionsegenskaperna hos radionuklidanaloger och växelverkan mellan mineral och grundvatten.

#### 7.1.1 Mål för verksamheten

Målen för insatser inom grundvatten och geokemi är att

- vidareutveckla kunskapen om kemin hos grundvatten och mineral. Först och främst för de processer och egenskaper som har betydelse för kapsel och buffertstabilitet, bränsleupplösning samt radionuklidmigration i säkerhetsanalysen,
- bekräfta den geohydrologiska beskrivningen av grundvattenströmning både i ett förvarsområde och regionalt,
- bestämma vilka kemiska förändringar som förvaret och eventuellt inströmmande vatten kan åstadkomma.

#### 7.1.2 Nuvarande kunskapsläge

Inom ramen för Äspöprojektet utförs en stor del av forskningsarbetet om grundvatten och geokemiska förhållanden. Dessutom utförs laboratorieförsök och utvärderingar i syfte att klargöra väsentliga processer och deras betydelse, t ex tillgänglig redoxbuffertkapacitet. Undersökningar och utvärderingar har fokuserats på de frågor som presenterades i FOU-program 89 och resultaten redovisas här under samma rubriker.

##### Grundvattentyper

I berggrunden förekommer salt och sött vatten. Dessa har olika ursprung och/eller olika uppehållstider. Salt vatten påträffas där stagnanta förhållanden råder eller antas ha rått. Vattnet är salt antingen pga en lång uppehållstid, som gjort att vattnet hunnit reagera med berget, eller pga att havsvatten någon gång har infiltrerat berggrunden. Ofta kan båda dessa processer ha bidragit.

Sött vatten härrör från regn och snö och är relativt det salta vattnet ungt (nybildat) grundvatten. Karakteristiskt för det söta vattnet är att dess egenskaper till stor del bestäms av reaktioner mellan löst koldioxid och kalcit. Då vatten tränger ned genom jordlagret upptar det koldioxid och blir aggressivt, speciellt mot lösliga mineral som kalcit.

Salt vatten påträffas vid olika djup beroende på de platspecifika hydrologiska förhållandena. Vid kustnära platser ligger saltvattengränsen nära markytan. Gränsen mellan sött och salt vatten är sällan skarp utan salthalten ökar i steg mot djupet. Salt vatten i SFR, Finnsjön och Äspö kan delvis härröra från Litorinahavet som var en föregångare till Östersjön, även om inslag av mycket äldre vatten också kan förekomma.

Grundvattnet på Äspö kan på basis av halten lösta huvudkomponenter grovt delas in i fyra klasser /7-1/. Av dessa består den första av sötvatten medan de övriga är salta. I Tabell 7-1 ges typiska sammansättningar för de fyra klasserna.

**Tabell 7-1. Karaktären för de fyra klasser som beskriver grundvattnet på Äspö.**

Klass	Klorid mg/l	Bikarbonat mg/l	Natrium mg/l	Kalcium mg/l
A	174±92	338±58	240±13	32±10
B	580±70	213±15	393±32	98±14
C	4171±1694	58±49	1392±553	1080±565
D	11001±1434	11±2	2776±587	3826±598

Sötvattenkudden, typ A vatten, på Äspö är grund. Vattenprovtagningar i 100 m djupa hammarborrhål visar att vattnet är salt redan på 40 till 50 m djup /7-2/.

Under sötvattnet finns ett tunt blandningsskikt där underliggande salt vatten blandats med det söta, typ B. Därefter ökar salthalten lineärt upp till en kloridhalt av 12000 mg/l vid 1000 meters djup /7-3/.

Ner till ca 500 meters djup ökar salthalten till en nivå som är dubbelt så hög som den i Östersjön. Under tidigare faser av Östersjöns utveckling anser man att Litorinahavet hade en salthalt som var tre gånger så hög som Östersjöns.

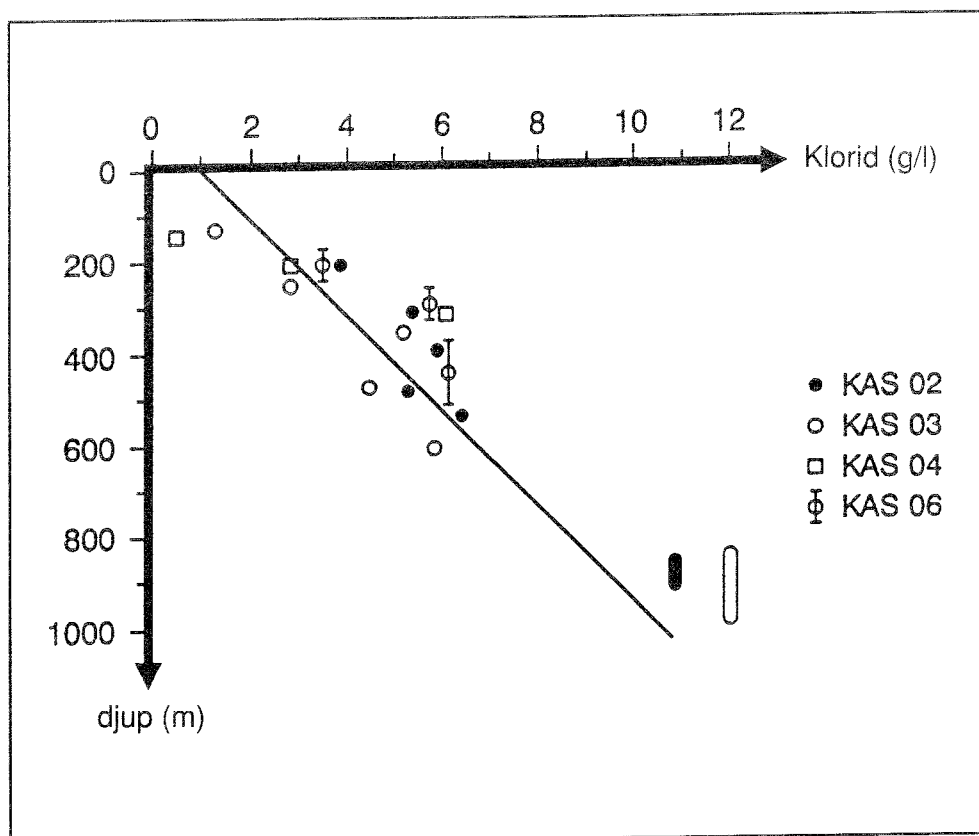
Under ca 500 meters djup ändrar grundvattnet karaktär även om salthalten fortsätter att öka kontinuerligt. Andelen kalcium ökar och blir högre än natrium.

Salthalten ökar i stort sett lineärt mot djupet, men i en del provtagningspunkter förekommer stora avvikelser. Dessa utgörs av vattenförande zoner och salthalten är antingen högre eller lägre än den som djupet föranleder, se Figur 7-1. Dessa zoner är antingen in eller utströmningsområden /7-1,7-4/.

### Grundvattnets omsättningstid

Grundvattnets omsättningstid kan beskrivas kvalitativt genom att sammanställa en rad olika mätningar och analyser. Hit hör radioaktiva isotoper, så som tritium och kol-14, stabila isotoper, så som deuterium, syre-18 och svavel-34, samt huvudkomponenter i vattnet och deras inbördes förhållanden. Det är inte möjligt att definiera någon exakt omsättningstid eftersom vattnet blandas kontinuerligt längs flödesvägarna och då förändringar sker i inflödesförhållandena till följd av nedisning, landhöjning etc.. Störningar från bormning och undersökning påverkar också dateringsmöjligheterna.

Resultat från syre-18 bestämningar styrker den uppdelning i grundvattenklasser som gjorts på basis av huvudkomponenterna. De grundvatten som provtagits i ytnära sektioner uppvisat ett värde som ligger i närheten av det som gäller för nederbörden idag. Följaktligen har detta grundvatten, klass A och B i Tabell 7-1, bildats efter att Äspö steg upp ur havet, under temperaturförhållanden som likar de som råder idag. Mot djupet förändras denna bild och vattnets syre-18 värde tyder på att ett salt (havs)vatten och ett sötvatten som härrör från kallare klimat har blandats i olika proportioner, klass C i Tabell 7-1. Vattnet från det kallare klimatet kan utgöras av glacialt smältvatten som pressats djupt ned i berggrunden i samband med inlandsisens recession och som senare pressats tillbaka av på nytt infiltrerande havsvatten. Högre densitet hos havsvattnet har gjort att det sjunkit ner under sötvattnet. Eftersom salthalten på detta havsvatten har varit högre än Östersjöns måste det härröra från Litorinahavet och infiltrerat berggrunden för mellan 7 000 och 3 000 år sedan.



**Figur 7-1.** Kloridhalten (salthalten) i grundvattnet på Äspö som funktion av djupet. En avvikelse från den räta linjen antyder att det provtagna intervallet står i kontakt med ett inströmningsområde (under linjen) eller ett utströmningsområde (över linjen).

På större djup än ca 500 m kan en blandning mellan ett glacialt smältvatten och Litorinahavsvatten inte längre förklara syre-18 värdena, klass D i Tabell 7-1. Detta vatten kan således vara opåverkat av isavsmältning och Östersjöns trans- och regressionser som ägt rum efter senaste istid.

Kol-14 dateringar som gjorts på Äspövatten ger åldrar på 5 000–30 000 år /7-4/, dvs inom hela det område som denna dateringsteknik omspannar. Inga vatten av klass D har kunnat analyseras pga det låga karbonatinnehållet. Emellertid visar analyserna på klass C vatten att omsättningstiden baserad på syre-18 analyser i stort överensstämmer med kol-14 dateringen. Dock finns det ett antal processer som gör att kol-14 dateringen ger en skenbart högre ålder än den verkliga. Dessa processer är

- upplösning av gammal kalcit,
- utbytesreaktion mellan karbonat i vattnet och karbonatmineral i berget (se kol-14 i kalcit),
- oxidation av abiotiskt metan till koldioxid.

Ett antagande om att uppskattningen baserad på syre-18 analysen är riktig betyder då att kol-14 analyserna visar en ca 3 gånger för hög ålder. Detta gäller endast för Äspö förhållandena men kan eventuellt också gälla andra platser som genomgått en likartad utveckling. I dagsläget kan emellertid motsvarande jämförelse inte göras på annan plats.

Tritiumanalyser, i vissa fall med mycket låg detektionsgräns (0,1 TU) visar att andelen modernt vatten i de djupa grundvattnen är mycket liten. Man kan dock

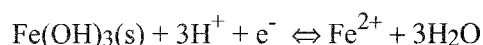


konstatera att även på stora djup förekommer ibland tritium i en mängd som motsvarar promillennivå (1TU) för andelen modernt vatten (infiltrerat efter de atmosfäriska vätebombsprängningarna som inleddes i slutet av 1950 talet). Det går inte att hävda att denna tritiumhalt enbart beror på tekniska störningar vid borrning och provtagning. Snarare är det så att olika aktiviteter, främst borrning och pumpning förorsakat en storskalig vattenomsättning som fört ner ytligt vatten till mycket större djup än det annars hade nått.

### Redoxförhållanden

Praktiskt taget allt grundvatten som provtagits är syrefritt och reducerande. Bakteriella och kemiska processer har förbrukat det syre som fanns löst i vattnet då det infiltrerade markytan. Halterna av sulfid och järn utgör den tillgängliga redoxbufferen i vattnet. Denna är tämligen liten medan den stora redoxbufferten utgörs av de järnmineral som finns i berget.

På basis av samtliga väl kontrollerade mätningar, i första hand sådana som utförts nere i borrhål har ett empiriskt samband mellan Eh och pH härletts. Detta baseras på data från 16 nivåer i 9 borrhål som har undersökts sedan 1984. Sambandet  $Eh = (260 - 60pH)$  mV stämmer väl överens med värden som teoretisk kan beräknas för vanligt förekommande mineral i berggrunden /7-5/. Ingående analys av utförda mätningar visar att samtliga kan förklaras av halten tvåvärt järn och lösligheten för Järn(III)hydroxid i vattnet /7-6/. Halten av trevärt järn i vattnet är så låg att den inte kan mätas utan beräknas i stället ur lösligheten för järnhydroxid. Precision i mätningarna är  $\pm 25$  mV och potentialen bestäms av reaktionen



$$\text{Detta ger } Eh = (707 \pm 59) \text{ mV} - \ln 10(\text{RT/F})(3pH + \log[\text{Fe}^{2+}])$$

Det är således järnsystemet, också i de fall då halterna är låga, som bestämmer elektropotentialen och den effektiva redoxintensiteten i grundvattnen. Halten av trevärt järn är beroende av kristallisationsgraden (åldern) hos järnhydroxiden. Den löslighet som omvänt kan beräknas ur Eh-data ligger i det intervall som omspannar allt från färsk amorf järnhydroxidfällning till kristallin götit.

Den tillgängliga redoxbuffert kapaciteten har bestämts genom att mäta inträngningsdjupet för syre som under 100 bars tryck stått i kontakt med olika berg och mineralprov. Genom att syrgastrycket hållits så högt har försöket simulerat den syrediffusion som sker under en tid av flera hundra år av kontakt mellan syremättat vatten och berget. Resultaten visar att syrediffusionen når mycket långt in i stenen /7-7/, 1 mm i mekaniskt knäckta borrhärnor och ända till 25 mm i naturliga sprickor. Skillnaden beror på att de naturliga sprickorna omges av en större mängd mikrosprickor än berget i genomsnitt. Baserat på dessa mätningar kan den tillgängliga redoxbuffertkapaciteten beräknas till 18–620 mol/kubikmeter berg.

I Äspötunneln har en sprickzon valts ut för detaljerad undersökning av redoxförhållanden i anslutning till en underjordsanläggning. I underlagsrapporten till FUD-program 92 angående Äspölaboratoriet finns en utförlig beskrivning av det storskaliga redoxexperimentet och de fortsatta redoxundersökningarna inom Äspöprojektet. Berggrunden och sprickzonen innehåller stora mängder tvåvärt järn, främst i mineralfaserna biotit och klorit. Den ökade vattenomsättningen som anläggningen förorsakar kan leda till att syresatt vatten dras ned till tunneln via sprickzonen. På denna väg reduceras det lösta syret genom reaktioner med reducerande ämnen i vattnet och reducerande mineral i berget. Beroende på vattnets sammansättning och flöde är olika reaktioner mest betydelsefulla. Vid snabba flödes hastigheter hinner endast i vattnet

lösta reducerande ämnen reagera med syret, medan vid långsamt flöde också de reducerande mineralen i sprickväggen hinner reagera.

Parallellt med fältförsöket pågår laboratoriemätningar för att bestämma vittringshastigheten för biotit och klorit. Finfördelat mineralpulver (75–125 µm) med en reaktionsyta av 1–5 m<sup>2</sup>/g utsätts i en reaktor för en vattenström av 1–20 ml/timme. Vittringshastigheten för biotit ligger för neutralt pH på 10<sup>-8</sup> mol/m<sup>2</sup> per timme. Ifall mineralet före försöket stått i kontakt med vatten är reaktionshastigheten tio till hundra gånger lägre. Det är således av stor betydelse vilken grundvattenhistoria mineralen upplevt.

### Sprickmineral grundvattenprocesser

Tidigare rådande grundvattenförhållanden kan spåras i sprickmineral. Järnhydroxid och kalcit kan användas för att spåra tidigare flödesvägar även om eventuella lågtemperatureffekter lätt dränks i de stora omvandlingar som tidigare hydrotermala förhållanden har förorsakat.

Fördelningen av uran och sällsynta jordartsmetaller (REE) mellan sprickmineral och grundvatten har undersöks både på Äspö och i Klipperås /7-8,7-9/. I Tabell 7-2 finns fördelningsfaktorn som beräknats ur data från de två platserna. I tabellen finns också de fördelningskonstanter (K<sub>d</sub>) som använts i SKB 91. Dessa baseras på mätningar som genomförts på laboratorier.

**Tabell 7-2. Fördelningskonstanter för uran och sällsynta jordartsmetaller i Äspö, Klipperås och SKB 91.**

Element	Fördelningskonstanter i m <sup>3</sup> /kg		
	Äspö	Klipperås	SKB 91 (K <sub>d</sub> )
Sr	0.002 – 0.17	1 – 4	0.003
Rb	0.4 – 10	22 – 160	(0.003)
Ba	1 – 3	5 – 30	(0.003)
Cs	0.02 – 2	19 – 6030	0.03
Eu	48 – 1504	900 – 1400	0.2
U	0.05 – 240	10 – 97	2
Ce	47 – 3400	2900 – 6800	(0.2)
Sc	125 – 1902	2000 – 7600	(0.2)

Även om SKB 91-konstanterna är aningen konservativa kan man konstatera att de ligger i närheten av de som erhållits från Äspö. Den stora skillnaden mellan konstanterna från Äspö och Klipperås beror på att den höga salthalten i Äspövattnet också medför en högre halt av spårämnen bl a sällsynta jordartsmetaller. Sprickmineralen från både Klipperås och Äspö innehåller liknande mängder REE och uran.

Inströmningsområden kännetecknas av att de ytligaste spricksystemen saknar kalcit som fyllnadsmaterial. Orsaken är att det koldioxidrika ytvattnet löst upp kalciten då det tränger ned i berggrunden. Dessutom sker ett utbyte mellan karbonat i kalcit och karbonat i det inträngande grundvattnet. Effekter av detta syns i syre-18 värdet i kalcit i de översta delarna av berget. Så är emellertid inte fallet med kol-14. Två olika undersökningar har gett ett mycket lågt kol-14 innehåll även i mycket ytnära zoner /7-10,7-11/. Det verkar som om utbytet mellan kol-atomerna är mycket begränsat medan syreutbytet går snabbt. Om utbytet mellan gammal kalcit i spricksystemen och

inträngande löst karbonat är litet så är även processen av ringa betydelse för kol-14 datering av grundvatten.

För att ytterligare förbättra kunskapen om grundvattnets ursprung och utveckling har andelen svavel-34 i sulfat i vattnet och i sulfid i sprickmineral från Äspö undersökts /7-12/. Resultaten visar att flera olika ursprung förekommer, nämligen marint, evaporitiskt (mycket gammalt) och organiskt. I de ytligare delarna av berget har sulfaten marint ursprung. I ett mellanskikt förekommer sulfatreduktion och blandning, medan de djupaste sulfatet har evaporitiskt ursprung. Både sulfid- och sulfatdata visar att sulfatreduktionen kan ha åstadkommit av bakterier.

Ökande grad av försurning har långtgående effekter på ytvattensystem, men kommer inte att påverka ett djupförvar. Försurningen som uteslutande härrör från förbränningen av fossila bränslen kan inte bli hur omfattande som helst. Mängden åtkomligt brännbart material är begränsat. Skulle användningen fortsätta i nuvarande takt kommer reserverna att vara uttömda om ca 300 år /7-13/. Effekterna kommer att finnas kvar i atmosfären i ytterligare 500 år. Vilken skadlig effekt det försurande nedfallet kommer att få beror helt och hållet på vilka krav som ställs på rökgasreningen. Utan strikta krav kommer det sura nedfallet över södra Sverige att bli så kraftigt att skogen dör. Efter att skogen dött kommer undervegetationen att dö så att marken blir helt steril och allt liv att omöjliggöras. I detta fall kommer berget att vittra ner till 150 m under de nästkommande 70 tusen åren då nästa stora istid beräknas komma. I alla övriga fall har försurningen en ringa betydelse.

### 7.1.3 Program 1993–1998

#### **Klassificering av grundvattenkemidata**

En systematisk klassificering av alla grundvattenkemiska data i GEOTAB har nyligen inletts. Målet är att gruppera samtliga data i kvalitets och typklasser. Kvalitetsklasserna är användbara vid matematiska modellövningar medan typklasserna skall utgöra underlag för att förklara vattnets ursprung och historia. Kvalitetsklassningen görs gemensamt med TVO i Finland, som samlat grundvattenkemiska datas från förundersökningar av fem olika platser.

Typklassindelning har tidigare gjorts med data från Äspö, se avsnitt 7.1.2. Liknande indelning görs för samtliga GEOTAB data efter att kvalitetsklassningen avslutats. Arbetet syftar till att göra utvärderingen av en undersökt plats enklare samt att ge alla data som insamlats en enhetlig värdering. Dessa data kan sedan användas för att analysera eventuella regionala flödesmönster, se vidare under tolkning av mineralgrundvattensamverkan och blandningsprocesser.

Statistiska metoder används i stor utsträckning för att genomföra klassificeringsarbetet. Multivariatanalys har visat sig användbar för i första hand typklassningen /7-14/ men skall även användas för kvalitetsklassningen. På så sätt blir inslaget av subjektiva bedömningar mindre, något som gör att en högre grad av exakthet kan nås med avseende på bl a osäkerheten i bedömningen.

Erfarenheterna från de inledande arbetet visar att det är en delikat uppgift att jämföra data från olika platser med varandra. Därför kommer arbetet att pågå under en längre tid och sannolikt ändra inriktning under tiden.

#### **Sorptionsegenskaper hos radionuklidanaloger**

Att bestämma fördelningskonstanter för radionuklidanaloger på basis av deras förekomsten i sprickmineral och vatten är ifrågasatt. Bland de faktorer som bidrar till tveksamheten är främst frågan ”Hur representativa är spårelementhalterna i sprickmi-

neral för dagens grundvattensammansättning?” Eftersom mängderna i sprickmineral från Klipperås och Äspö var mycket lika trots att halterna i grundvattnet var mycket olika kan man misstänka att av spårelementhalterna i sprickmineralen härrör från förhållanden helt andra än dagens, t ex hydrotermala.

Det redan tidigare undersökta sprickfyllnadsmaterialet från Äspö och Klipperås skall bearbetas vidare för att besvara frågan om hur spårelementen sitter bundna i mineralen. Mineralproven skall utsättas för en allt kraftigare lakning för att andelen utlösta radionuklidanaloger successivt skall kunna bestämmas. På så sätt kan man sluta sig till vilka processer som kvarhållit olika andelar i mineralen. Som en avslutning av dessa undersökningar skall en traditionell  $K_d$  bestämning genomföras. Denna går ut på att mineralen utsätts för en lösning av samma ämnen som tidigare lösts ut. Efter att dessa uppnått en fördelningsjämvikt mellan vattenfasen och mineralfasen bestäms en ny fördelningskonstant, ett ”äkta  $K_d$  värde”.

Parallellt kommer olika isotopstudier att genomföras i syfte att förbättra kunskapen om vattnets och sprickmineralens historia. Bland de metoder som oftast diskuteras kan nämnas uran-serien, strontium-86/87, svavel-34. Dessa arbeten kommer i stor utsträckning att förläggas till den sprickzon i Äspötunneln där det storskaliga redox-experimentet pågår. Arbetet är en del av ett planerat samarbetet mellan DOE och SKB inom ramen för Äspöprojektet.

## **Tolkning av mineral-vatten samverkan och blandningsprocesser**

### *Regional grundvattenströmning*

Kemidata från Äspö, Finnsjön och Stripa visar att vatten som provtagits på flera hundra meters djup har en mycket långsam omsättning. De faktum att vattnen är salta visar att deras medeluppehållstid är mer än 5 000 år. I detta tidsperspektiv har även eventuella regionala grundvattenströmningar betydelse. Tillgängliga data skall analyseras för att ge klarhet i vilken betydelse eventuella regionala grundvattenflöden kan ha för ett djupförvar. Förutom salthalten kan isotopdata som deuterium, tritium, kol-14, syre-18 och eventuellt svavel-34 användas.

### *Försurning*

Effekterna av den pågående försurningen kommer inte att påverka djupförvaret. Emellertid kunde enstaka konduktiva kanaler leda det sura vattnet lägre än försurningsfronten. Detta fenomen kommer att belysas kopplat till hydromodellresultaten i SKB 91.

### *Stagnant vatten*

Grundvatten som provtagits i vattenförande sprickor och zoner har alltid karaktären av blandning mellan många olika ursprungstyper. Därför visar det sig också att jämviktsmodellering endast kan tillämpas med avseende på de allra snabbaste reaktionerna som t ex syra bas jämvikter med kalcit och löst karbonat, löslighet av troilit och gips och redoxreaktioner med tvåvärt järn och järnhydroxid.

Under byggfasen av Äspötunneln kommer en utrustning som gör det möjligt att provta ner till  $10^{-11}$  m/s att utvecklas, se avsnitt 9.3.2. Förutom de tidigare analyserade huvud och redoxkomponenterna skall även de väsentligaste spårelementen analyseras. Eftersom det mer stagnanta vattnet i bergets mikrospricksystem troligen har en längre uppehållstid med lägre grad av omblandning kan man förvänta sig att detta vatten är annorlunda och mer präglad av den lokala bergarten än de vatten som provtas i konduktiva sprickzoner. Jämviktsmodellering med dessa grunddata kan visa sig mer motiverad än den varit hittills.

### *Redox*

Redoxförhållandena i grundvattnet och i kringliggande mineral kommer att dokumenteras inom pågående och planerade redoxexperiment, se avsnitt 4.7.3 i underlagsrapporten till FUD-program 92 angående Äspölaboratoriet.

Eh mätningarna på grundvatten kommer att fortgå även om intensitetsvärdet inte förväntas ligga utanför det modellerade intervallet, se avsnitt 7.1.2. Främsta anledningen är att Eh mätningarna är den i särklass känsligaste metoden för att spåra inslag av syre. I Äspötunneln kan man nämligen inte utesluta att enstaka punkter kan leda ner ytvatten så snabbt att det inte hunnit reagera med de reducerande komponenterna i grundvattnet och berget.

Aktiva insatser planeras för att bestämma den tillgängliga redoxkapaciteten i berget. Underbyggande laboratoriemätningar har genomförts och pågår, se under 7.1.2, för att bestämma syreindiffusionen och vittringskinetiken. Med dessa som bas skall likartade arbeten utföras in situ. Där har redan experimentet utförts av naturen varför endast analys och tolkning kvarstår. Förutom indiffusion, vittringskinetik och transporttid är det nödvändigt att bestämma den väta ytan, dvs. den yta över vilken reaktioner mellan syre som finns löst i vattnet och mineralen sker.

### *Platsundersökningar*

Inom ramen för de geovetenskapliga undersökningar av djupförvarsplatser ingår grundvatten och geokemi som väsentliga delar. Den kunskap som erhållits kommer att utgöra grund för planering och optimering av insatserna.

## **7.2 RADIONUKLIDKEMI**

### **7.2.1 Mål för verksamheten**

Målen för radionuklidkemiundersökningarna är att vidareutveckla dataunderlaget genom att

- mäta och sammanställa kemiska basdata för löslighet och oorganisk speciering av radionuklider i och utanför djupförvaret,
- bestämma halter, stabilitet och rörlighet av radionuklider i form av kolloider, organiska komplex och mikrober,
- bestämma radionuklidernas retention i berg och återfyllnadsmaterial på grund av sorption, medfällning, och diffusion,
- fastställa inverkan av redoxreaktioner, radiolys och mikrobiella processer.

För det första delmålet är internationellt samarbete av stor betydelse. Det är ett mycket omfattande arbete som ligger bakom de termodynamiska konstanter som används för att beräkna löslighet och speciering av radionuklider i grundvattnet. Ett land skulle behöva avsätta oproportionerligt mycket arbete för att ensamt klara detta. Egna mätningar görs därför där brister identifierats eller högre noggrannhet eftersträvas.

Internationella sammanställningar av kemiska data för radionuklider är speciellt värdefulla eftersom det innebär att de valda värdena har en bred acceptans. För att användas i säkerhetsanalysen är det väsentligt att kemidata är väldokumenterade vid behov kvalitetssäkrade.

Utvecklingen beträffande kolloider, organiska komplex och mikrober har kommit ett gott stycke på väg. Det finns numera bra analyser av kolloidala partiklar, huminämnen och mikrober i grundvattnet. Laboratorieundersökningar av radionuklidens bind-

ning och transport med dessa aggregat genomförs. Man prövar även att utveckla modeller för komplexbildning med huminämnen och partikeltransport.

Det tredje delområdet förser transportmodellerna med antingen relevanta data eller submodeller som beskriver retentionen av radionuklider i berg och återfyllnadsmaterial. Det ingår också som en väsentlig del att demonstrera förståelsen av retentionsmekanismerna och pröva stabiliteten i de använda konstanterna.

Radiolys, redoxreaktioner och mikrobiella processer är av betydelse för radionuklidernas kemi och förändringar i närområdet. Det fjärde delmålet avser att identifiera de reaktioner av den här typen som äger rum och är av betydelse för säkerheten.

## 7.2.2 Nuvarande kunskapsläge – Resultat

### Löslighet, speciering, medfällning och kinetik

Kemiska jämviktsmodeller används i ökande utsträckning för att beräkna löslighet och speciering av radionuklider i grundvatten. De termodynamiska konstanter som behövs för beräkningarna finns samlade i databaser. Såväl i Sverige som på andra håll utförs mätningar för att förbättra noggrannheten på de viktiga konstanterna så att mindre konservativa antaganden blir möjliga. Där man inte väl känner konstanterna blir man annars tvungen att anta höga lösligheter av radionukliderna. Det kan också bli nödvändigt att utgå från att den upplösta radionukliden föreligger i en sådan form att den blir lätttröglig i berg och återfyllnadsmaterial. För säkerheten viktiga radionuklider med en relativt komplicerad kemi är uran, torium, neptunium, plutonium, americium, curium, protaktinium, radium, teknetium, nickel, niob och tenn.

Lösligheten av schöpit och uranfösfat har bestämts /7-15 och 7-16/. Experiment med uransilikat pågår. Redoxpotentialen för uranyl till uran(IV) har bestämts /7-17/ och konstanterna för bildning av karbonatkomplex av uran och torium har mätts med potentiometrisk metod /7-18 och 7-19/. En sammanfattning av detta har presenterats som en avhandling av Bo Lagerman /7-20/. Även andra tekniker har utnyttjats. I samarbete med ISPRA i Varese, Italien, har laserspektroskopi använts för att undersöka uran(VI)karbonatkomplex /7-21/. Lösningsextraktion med en speciell utrustning, AKUFVE-LISOL används för att bestämma karbonat- och hydroxidkomplex av torium och uran(IV). Efter lyckade förförsök med tulium har även experiment med toriumhydroxidkomplex genomförts. Man kunde konstatera att tidigare konstanter för tri- och tetrahydroxidkomplexen var överskattade /7-22/.

Neptunium och plutonium har hitintills undersökts i samarbete med utländska institutioner t ex CEA i Frankrike som har goda förutsättningar att arbeta med de här ämnena. Ett urval och en prövning av de termodynamiska konstanter för plutonium har genomförts för senare användning i geokemikoden EQ3NR /7-23/. Bra konstanter för neptunium och plutonium är av sådan vikt för säkerhetsanalysen att vi även har initierat egna mätningar på specifika problemområden.

Americium är relativt välkänd men karbonatkomplexen kan behöva utredas ytterligare. Lösligheterna för radium, curium och protaktinium har hittills inte behövts för beräkning av t ex bränsleupplösning.

Lösligheten av teknetiumdioxid har uppmätts i neutrala och alkaliska karbonatlösningar, se Tabell 7-3, /7-24/. För de redoxpotentialer som kan bli aktuella i samband med utlakning av bränsle i ett djupförvar så är de stabila fasta teknetiumfaserna antingen teknetiumdioxid eller metalliskt teknetium. Andra faser är inte stabila i neutrala vatten.

**Tabell 7-3. Jämviktskonstanter för teknetium (IV) i karbonhaltiga lösningar /7-24/.**

Jämviktsreaktioner	Jämviktskonstanter log K
$\text{TcO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O} = \text{TcO}(\text{OH})_2(\text{aq})$	$-8.17 \pm 0.05$
$\text{TcO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} = \text{TcO}(\text{OH})_3^- + \text{H}^+$	$-19.06 \pm 0.24$
$\text{TcO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2(\text{g}) = \text{Tc}(\text{OH})_2\text{CO}_3(\text{aq})$	$-7.08 \pm 0.08$
$\text{TcO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O} = \text{Tc}(\text{OH})_3\text{CO}_3^- + \text{H}^+$	$-15.34 \pm 0.07$

Nickels löslighet i ett djupförvar torde vara begränsad genom bildningen av sulfid. Lösligheten av nioboxid är någorlunda välkänd. Termodynamiska data som beskriver lösligheten för tenn är osäkra. Det är emellertid tveksamt om tennisotoper är så pass väsentliga för säkerheten att noggrannare bestämningar av tennkemin är motiverade.

SKB har kontinuerligt stött medverkan av svenska experter i det internationella OECD/NEA-projektet TDB. Projektets målsättning är att sammanställa och kvalitets-säkra en databas med termodynamiska konstanter för löslighet och speciering av relevanta radionuklider. Dessutom deltar SKB aktivt i det av CEC arrangerade projektet CHEMVAL som prövar geokemiska koder och förbättrar tillhörande databaser.

Medfällning sänker lösligheten för en radionuklid avsevärt och kan leda till en fixering av radionukliden till en mineralfas. Medfällning i samband med bildning av kalcit har undersökts /7-25/. Andra tänkbara processer som kan orsaka medfällning är oxidation av metalliskt järn eller järn(II)joner och reduktion av uran(VI)joner. Svårigheter med att dels kvantifiera medfällningsprocessen och dels garantera fällningens stabilitet för tillräckligt lång tid har lett till att man ännu inte utnyttjat det här mer än marginellt i säkerhetsanalyserna. Bildningen av medfällningar och deras stabilitet undersöks i samband med de naturliga analogerna till deponering av radionuklider, se kapitel 8.

Det är viktigt att visa att de kemiska reaktioner som deltar i t ex en löslighetsbegränsande jämvikt verkligen äger rum. Redoxreaktioner som är flerelektronprocesser eller där fasta faser är inblandade kan brista i reversibilitet och orsaka ojämvikt. Laboratorieförsök /7-26 och 7-27/ och även in-situtester, se avsnitt 7.3, har genomförts för att demonstrera att teknetium verkligen reduceras i djupa grundvatten. Reaktioner på mineralalytorna har visat sig vara väsentliga i sammanhanget.

### Organiska komplex, kolloider och mikrober

Det naturliga innehållet av upplösta organiska ämnen har provtagits i flera djupa grundvatten från Finnsjön, Fjällveden, Forsmark, Gideå, Lansjärv, Stripa och Äspö /7-28/. Det relativa innehållet av humus- och fulvosyror samt deras kemiska karaktär varierar inte mycket mellan de olika platserna /7-28, 7-29 och 7-30/. Det är snarare djupet som är av betydelse för den totala halten organiska ämnen och deras sammansättning. Det djupa grundvattnets fulvosyror har en kol-14 ålder på mellan 1 000 och 10 000 år.

Fulvosyrorna utgör den helt dominerande andelen av huminämnen. Komplexbildning mellan fulvosyror och metalljoner har undersökts /7-31 och 7-32/. Trivalenta metalljoner bildar starka komplex med fulvosyror. Det har man även kunnat påvisa genom direkta analyser av komplexet med spektroskopiska metoder /7-33/. Man kan

utgå från att trivalenta radionuklider som americium kommer att uppträda som fulvo-komplex i grundvattnet.

Partiklar och kolloider provtas regelmässigt genom filtrering i samband med grundvattenprovtagning. Mängden partikulärt material och sammansättningen analyseras. Det varierar en del med djupet. Koncentrationen av kolloider är relativt låg i djupa grundvatten. Kalcitpartiklar är vanliga i prover från djupet. Dessutom förekommer järnhydroxid, järnsulfider, kvarts etc.

Migrationsförsök har genomförts med götitkolloider i kolonner som fyllts med kvartspulver. Olika koncentrationer av götitkolloider, olika pH och olika vattenflöden genom kolonnen prövades. Ett markerat beroende av flödet noterades. Försöken utfördes vid Oak Ridge National Laboratory i USA av Birgit Sätmark med stöd från Chalmers Tekniska Högskola och SKB.

Sorption av teknetium, strontium, cesium och prometium på kolloider av silika, bentonit och finmald granit har uppmäts som funktion av pH och partikeldiameter /7-34/. Inverkan av pH, jonstyrka och fulvosyror på storleksfördelning och ytladdning hos kolloidala partiklar av kvarts och järn(III)hydroxid har undersökts /7-35/.

Mikrober har analyserats i prov på djupa grundvatten som tagits i Stripa och på Laxemar, Ävrö och Äspö /7-36, 7-37 och 7-38/. Halten av bakterier är vanligen några hundratusen per ml. Metanbakterier och sulfatreducerare har konstaterats /7-37/. Man har visat att bakterierna i grundvattnet har en tendens att sätta sig fast på ytor som kommer i kontakt med grundvattnet /7-38 och 7-39/.

Experiment har genomförts med sorption av radionuklider på bakterier /7-39 och 7-40/. Upptag av prometium på bakterien *Shewanella* visade sig vara reversibelt och starkt pH-beroende, se Figur 7-2. Prometium användes som modell för en trevärd starkt sorberande radionuklid.

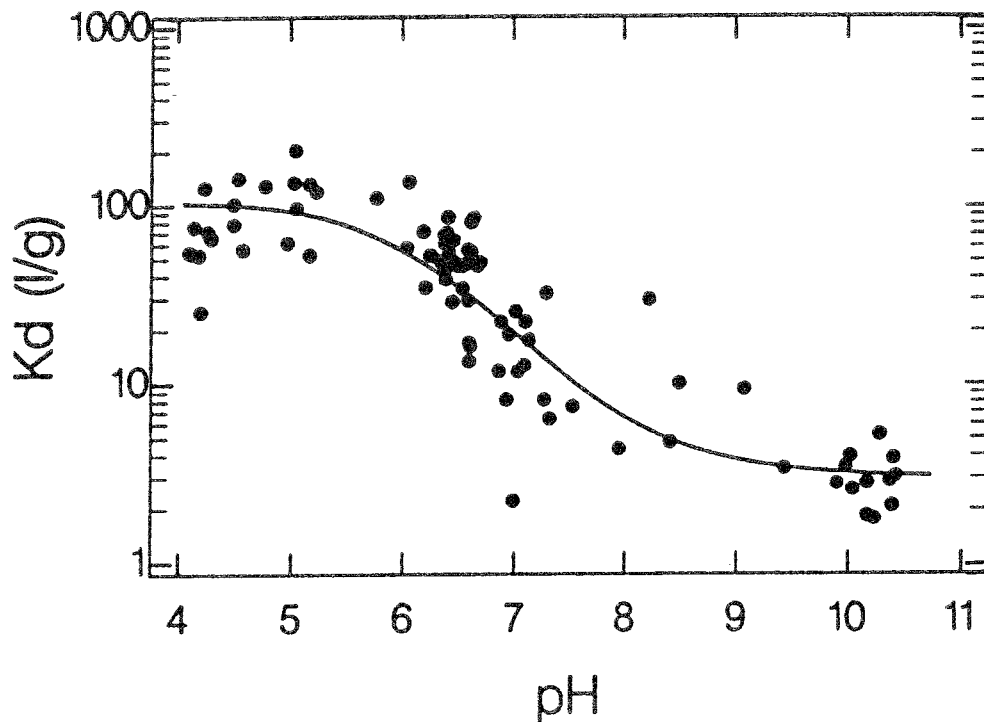
Inför SKB 91 har inverkan av kolloider, mikrober och naturliga organiska ämnen på radionuklidtransporten analyserats. Utvärderingen baserar sig framförallt på grundvattnets halt av de här aggregaten och hur starkt de binds till olika radionuklider. De organiska komplexen kommer att orsaka en minskning av sorptionskoefficienterna  $K_d$ . Storleken på minskningen beror på radionuklidjonens valens och koncentrationen av huminämnen i grundvattnet. Kolloidala partiklar och i viss mån även bakterier kan ta upp radionuklider. Om upptaget är reversibelt så är det här av, mindre betydelse för radionuklidretentionen. Om däremot upptaget är irreversibelt så blir situationen besvärligare. I sämsta fall skulle partiklarna kunna transportera radionuklider med vattnets hastighet. Beräkningarna visar emellertid att även i ett sådant fall är det inte mycket som transporteras genom att halterna kolloidala partiklar i djupa grundvatten är förhållandevis låga /7-41/.

Den internationella arbetsgruppen COCO som tillsatts av CEC utreder betydelsen av naturliga kolloider och komplex för transport av radionuklider från ett förvar. SKB stöder deltagande av svensk expertis i den gruppen.

### **Sorption och diffusion**

Sorptionsförsök har genomförts med cesium, strontium och europium på granit där man visat på betydelsen av indiffusion i bergets mikrosprickor /7-42/. Sorptionsförsök med teknetium under simulerade naturliga reducerande förhållanden visar att teknetium sorberas som Tc(IV) och därmed har ett högt  $K_d$  värde nere i berget. Det resultatet bekräftas av observationer i samband med spår-försök in-situ med teknetium, se avsnitt 7.3.





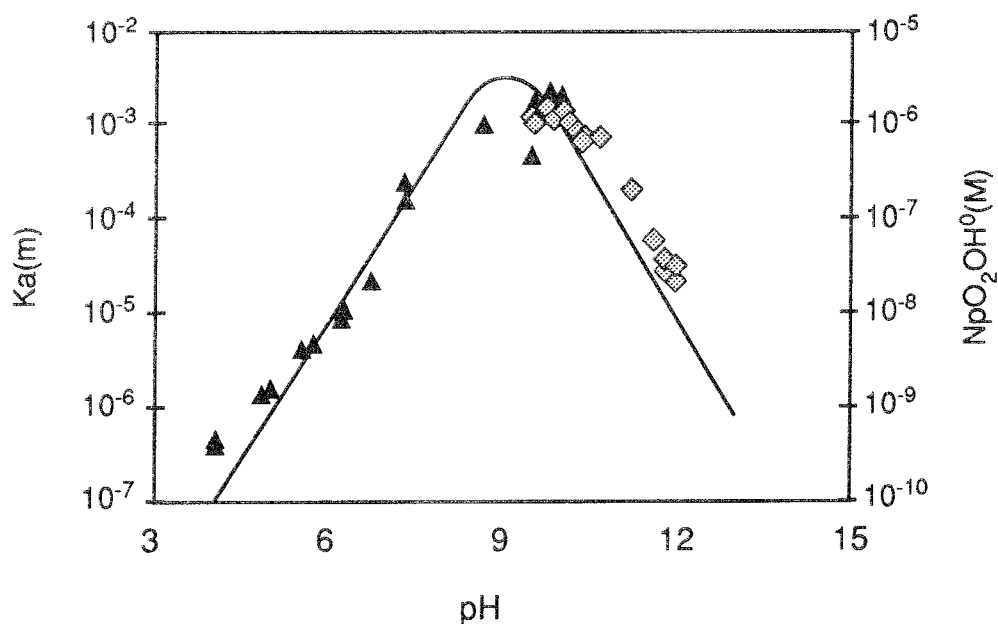
**Figur 7-2.** Sorption av prometium,  $Pm^{3+}$ , på bakterien *Shewanella putrefaciens* som funktion av pH /7-39/.

En aktuell sammanställning av sorptionskoefficienter för säkerhetsrelevanta radionuklider på bergmineral har gjorts /7-43/. Baserat på den sammanställningen har ett urval av  $K_d$ -värden tagits fram för att användas i transportberäkningarna inom säkerhetsanalysen SKB 91 /7-41/.

Grundläggande experiment har genomförts för att pröva ytkomplexering som modell för sorption av radionuklider på mineral. Det primära syftet med försöken är att öka förståelsen av de processer som är involverade i sorptionen. En serie inledande försök har genomförts med adsorption av karbonat på mineralet götit /7-44/. Experimenten har fortsatt med neptunium(V) /7-45/. Det förtjänar att nämnas att sorptionen av neptunyljoner på götit och även hematit är påtaglig, se Figur 7-3. Järn och järnföreningar har därför goda barriäregenskaper. Deras främsta kemiska förtjänst är att de verkar som reduktionsmedel i närområdet, men de är även effektiva sorbenter efter att de oxiderats. Undersökningarna har utförts i samarbete med det Los Alamos National Laboratory i USA.

Diffusionsförsök har genomförts med americium, plutonium, uran, neptunium, cesium, jod och teknetium i 90/10 blandningar av sand och bentonit (MX-80) /7-46/. Diffusiviteten  $D_a$  är ungefär en storleksordning lägre för sand/bentonitblandningen jämfört med ren bentonit. Radionuklidjonens egenskaper har mycket stor inverkan på diffusiviteten. Anjonerna jodid och perteknetat har diffusiviteter som ligger fyra storleksordningar över vad de trevärda katjonerna av americium ger. Plutonium (trivalent och tetravalent) diffunderade omätbart sakta.

Konstanter som behövs för att beräkna radionukliddiffusion i bentonitlera och granitiskt berg (Finnsjön) har sammanställts för att användas till transportberäkningarna för säkerhetsanalysen SKB 91 /7-47/.



**Figur 7-3.** Uppmätt sorption av neptunium (V) på hematit i två försök:  $\blacktriangle$  och  $\blacklozenge$  jämfört med beräknad halt av  $NpO_2OH$  (som är en av de lösta Np(IV) specierna). Beräkningarna är utförda med EQ3 och konstanterna hämtade från Allard et al., *Inorganica Chim. Acta* 94 (1984) s 205-221.

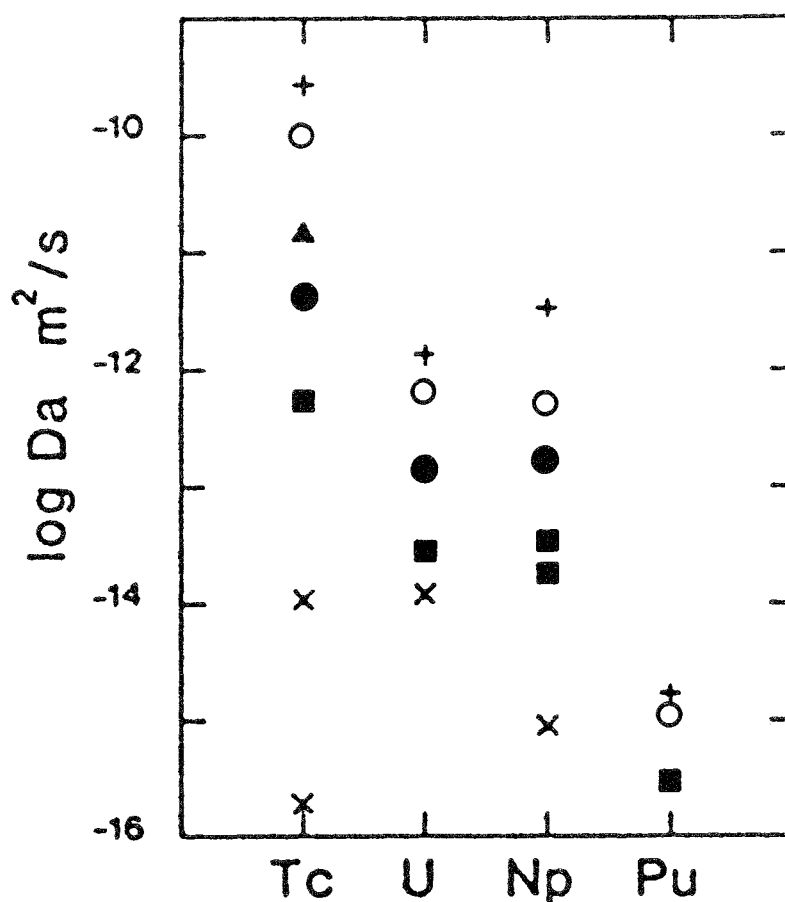
Tillsatser till bentonit har prövats för att se om man därigenom ytterligare kan bidra till retentionen av radionuklider i bufferten /7-48/. De tillsatser som prövats är järn, koppar, järn(II)oxid, koppar(I)oxid, vivianit (järn(II)fosfat), magnetit och järnmineral som förekommer som sprickfyllnadsmineral, se Figur 7-4. Försöken utfördes under syrefria förhållanden och diffusiviteten. För uran, plutonium, neptunium och teknetium uppmättes. De största effekterna fick man inte oväntat för järn och järn(II)oxid. I andra fall var nedsättningarna i diffusivitet små. Rent allmänt kan man dra slutsatsen att järn och koppar som kapslingsmaterial och deras korrosionsprodukter kan bidra till retentionen av frigjorda radionuklider genom att sorbera dem. Värdet av att extra tillsätta de här ämnena till bentonitbufferten är emellertid diskutabelt. Varje ämne som tillsätts till bentoniten måste ju vara så beskaffat att det säkert inte äventyrar bentonitens övriga goda egenskaper t ex plasticitet och svällförmåga.

Långtidsförsök med radionukliddiffusion i betong har genomförts men ännu inte avrapporterats. Den kemiska sammansättningen av cementporvatten har undersökts och avrapporterats /7-49/.

### 7.2.3 Program 1993–1998

#### Löslighet, speciering, medfällning och kinetik

En del av de termodynamiska konstanter som beskriver löslighet och speciering av aktinider i djupt grundvatten behöver mätas noggrannare för att undvika överkonserverativa antaganden i säkerhetsanalysen. Därför pågår undersökningar av lösligheten för neptunium(IV) liksom bildningen av karbonat- och hydroxidkomplex för Np(IV) och Np(V). Undersökningar av lösligheten för plutonium(IV) som funktion av Eh, pH och karbonatkoncentration har initierats. Komplexbildningsdata för americium(III) i karbonathaltiga lösningar kan behöva granskas för att se om ytterligare experiment är nödvändiga. Försök pågår även att bestämma fosfatkomplexen för torium(IV). Även uran(IV) bör inkluderas i fosfatexperimenten.



**Figur 7-4.** Uppmätt diffusivitet av radionuklider i ren kompakterad bentonit (O) och i bentonit med olika tillsatser: 1% Fe (X), 1% FeO (■), 1% Cu (●), 1% CuO (▲) och till sist en blandning av 10% bentonit och 90% sand (+) /7-48/.

Betydelsen av medfällningen som begränsande faktor för radionuklidmigration och dess användning behöver utredas ytterligare. Detta pågår. Även internationellt undersöks hur medfällningen kan utnyttjas. Det sker inom CEC projektet CHEMVAL där även SKB är representerade.

Försök genomförs för att visa att neptunium reduceras under de geokemiska förhållanden som råder nere i berget.

#### Organiska komplex, kolloider och mikrober

Provtagning och analys av grundvattnets innehåll av de här ämnena är alltjämt en mycket viktig del i utvärderingen av deras betydelse. Utom på platser som Äspö, Laxemar etc har vi även fått möjlighet ta sådana prover i samband med studier av sk naturliga analogier i t ex Poços de Caldas, Cigar Lake, Oklo etc. Det senare är särskilt värdefullt eftersom man här också har med flera av de element som uppträder som radionuklider i avfallet.

Laboratorieförsök med radionuklider och huminämnen kommer att fortsätta. Allt löst organiskt material är emellertid inte humus- och fulvosyror. Det finns en stor fraktion av andra organiska föreningar som är hydrofila men har mindre förmåga att komplexbinda jämfört med humus- och fulvosyror. Det är angeläget att närmare karaktärisera den här komponenten.

Ytterligare laboratorieförsök med kolloider och radionuklider kommer att utföras. Eftersom halten av naturliga kolloider i de naturliga grundvattnen är låg koncentreras dessa insatser till de kolloider som genereras i närområdet. Arbetet innefattar även kolonnförsök. Modeller för kolloidtransport och sorption på kolloider kommer i viss utsträckning att prövas.

Det är väsentligt att utreda mikrobernas betydelse. Det gäller då inte enbart deras inverkan på frigörelse och migration av radionuklider, utan även deras förmåga att åstadkomma geokemiska förändringar. Provtagning och experiment i samband med Äspölaboratoriet kommer även i fortsättningen att vara en viktig del av de här undersökningarna.

### **Sorption och diffusion**

Ytkomplexeringsmodellen för sorption av radionuklider på mineral kommer att prövas ytterligare. Det primära målet är att förstå sorptionsprocesserna och förutse vad som skulle kunna påverka dem. Huruvida det går att ersätta  $K_d$ -konceptet med något som är bättre återstår att se. För att avgöra detta är det av stort intresse att följa de ansträngningar som görs i andra länder och i internationella projekt t ex CHEMVAL.

En väsentlig faktor för beräkningen av retentionen pga sorption och diffusion in bergets mikrosprickor är den yta som radionukliderna kommer i kontakt med då de följer med grundvattenflödet. Det är angeläget att få fram bra mätningar av den här kontaktytan.

Ytterligare försök med diffusion i återfyllnadsmaterial och betong kan bli nödvändiga. Det beror på utvecklingen av olika koncept för deponering av radioaktivt avfall och den sammanställning av diffusionsmätningar i betong som ännu inte är avslutad. Målsättningarna för betongstudierna vidgas till att omfatta alla typer av långlivat avfall, dvs inte enbart högaktivt. Häri ingår som ett delmål att undersöka betongens inverkan på omgivningen och avfallet samt att bestämma betongens kemiska och strukturella förändring med tiden, se även kapitel 12.

## **7.3 VALIDERING AV PROCESSER I TRANSPORT-MODELLER OCH RADIONUKLIDMIGRATION**

### **7.3.1 Mål för verksamheten**

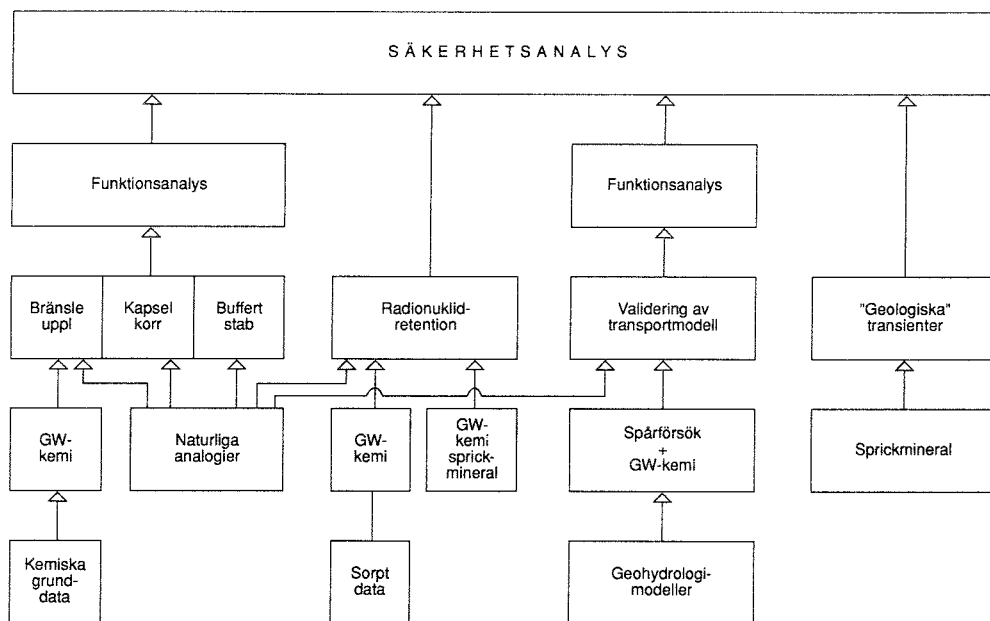
Målet är att utveckla förståelsen och validera de modeller som används för att beskriva frigörelse, kvarhållning och spridning av radionuklider från ett slutförvar.

Validering sker genom

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

### **7.3.2 Nuvarande kunskapsläge**

Radionuklidmigration i allmänhet skiljer sig avsevärt från transport av i vattnet lösta ämnen. Transport av vattentrogna lösta ämnen bestäms huvudsakligen av vattenflödet och dispersion, se närmare avsnitt 7.2.3, medan nuklidmigrationen i hög grad styrs av vattnets och nuklidernas kemiska egenskaper. Visserligen har en del radionuklider så som jod-131 och kol-14 låg sorption då de uppträder som jodid- respektive karbonationer, men inte ens de här jonerna är helt vattentrogna. I transportberäkningar



**Figur 7-5.** Illustration av hur olika slags data används för att modellera och validera transport.

behandlas de emellertid ofta så. Figur 7-5 åskådliggör vilka metoder man kan använda sig av för att bestämma grundvattentransport respektive nuklidmigration.

Hydrauliska data som mätts i borrhål ligger till grund för de modeller som används för att beräkna grundvattenflödet. Modellerna kan valideras med hjälp av spårförsök där vattentrogna spårämnen används.

Nuklidmigrationen bestäms i första hand av nuklidernas egna kemiska egenskaper och i andra hand av grundvattnets och mineralens kemiska beskaffenhet. Sorption av lösta radionuklider fördröjer deras utträde till biosfären. Förutom ren fysikalisk-kemisk sorption på mineralytorna förekommer även diffusion in i bergmatrisen via de mikrosprickor som förbinder de stagnanta porvattnet med det yttre strömmande vattnet.

Styrkan hos sorptionen är beroende av nuklidens laddning, hydrolys och förekomsten av komplexbildare. Därav följer att grundvattnets redoxförhållande, pH och innehåll av komplexbildare, t ex fulvo- och humussyror är väsentliga faktorer för att beskriva nuklidmigrationen. Kolloidala faser är i förekommande fall även av betydelse. Skillnaden i sorptionsstyrka mellan de olika radionuklidernas redoxstillstånd är mycket större än den skillnad som normala variationer i grundvattensammansättning och mineral kan förorsaka.

Retarderande processer som sorption och matrixdiffusion är beroende av hur stor yta som finns tillgänglig för interaktion med berget. Förekomsten av preferentiella flödesvägar kan minska retentionen av upplösta radionuklider. Den senare tidens forskning har till stor del inriktats på att försöka karakterisera dessa flödesvägar.

## **INTRAVAL**

SKI har initierat och lett ett internationellt projekt INTRAVAL. Projektet syftar till att öka förståelsen av hur olika processer, viktiga för radionuklidtransport, kan beskrivas med matematiska modeller. Detta har gjorts genom att systematiskt utnyttja information från laboratorieförsök, fältförsök och studier av naturliga analogier för att försöka validera olika konceptuella modeller och studera valideringsprocessen. Spår-försöken i Finnsjön och Stripa har utgjort en viktig del av de experiment som använts. INTRAVAL har också medfört att modellörer och experimentalister kunnat samarbeta vilket utmynnat i förslag till nya typer av försök som kan skilja mellan processer som kanalbildning, matrixdiffusion och dispersion. En viktig slutsats från INTRAVAL-studien är att försök i olika skalor med olika flöden, koncentrationer, etc. är nödvändiga för att kunna särskilja dessa processer.

Projektets första fas har slutförts. INTRAVAL Fas 2 har nu inletts med fokus på fältförsöken varav återigen Finnsjön- och Stripaförsöken utgör viktiga bidrag. Arbetet har så här långt visat att stokastiska modeller kan vara användbara för att beskriva heterogeniteter i kristallin berggrund, speciellt om modellerna även kan ta in deterministisk information om sprickzoner.

### **Laboratorieförsök**

Naturliga vattenförande sprickor väljs ut och överborras. De här borrhämlarna kan sedan användas för migrationsförsök i laboratorium. Borrningen utförs så att sprickan i möjligaste mån hamnar längs borrhålens axel. Kärnan förses med en tät mantel och ett inlopp respektive utlopp i ändarna. Sådana här kärnor har hittills tagits från bl a Stripa. På senare tid har även lämpliga borrhål valts ut från Äspö.

Två typer av experiment utförs: migrationsförsök med radionuklider och inaktiva spårämnen samt flödesexperiment. I det senare fallet är stenen inspänd så att sprickan kan pressas samman med olika tryck.

Tidigare resultat av laboratorieförsöken med migration av radionuklider genom en vattenförande spricka har utvärderats inom det internationella INTRAVAL projektet.

Utrustning, där olika aspekter av radionuklidmigration prövas, utvecklas för att senare kunna användas i kemiskt orienterade in-situförsök.

### **Spårförsök**

Spårförsök är den enda metoden med vars hjälp man i större skala kan bestämma bergets förmåga att transportera och fördröja radionuklider. Resultat från spårförsök används för att verifiera och validera olika modeller för grundvattenströmning och transport samt för att utveckla nya modellkoncept. Enhåls spårförsök, s k utspädningsmätningar, används för att mäta grundvattenflödet genom avgränsade delar av borrhål medan flerhålsförsök används för att bestämma transportparametrar och konnektivitet mellan sprickor och sprickzoner.

Spårförsök har utförts i olika skalor och med delvis olika syften, Storskaliga försök i Finnsjön har gjorts i syfte att studera transporten i högkonduktiva sprickzoner, som förväntas utgöra de yttre hydrauliska gränserna för ett förvar. Försök i samband med förundersökningarna på Äspö har utförts för att bestämma transportparametrar och konnektivitet mellan sprickzoner medan de mer småskaliga försöken i Stripa har fokuserats på transporten i lokala sprickzoner och enskilda sprickor. Samtliga dessa försök visar att bergets heterogenitet och konnektiviteten mellan sprickor och sprickzoner spelar en stor roll för transporten.

### *Stripa*

Inom ramen för det internationella OECD/NEA-projektet har ett flertal spår försök genomförts i Stripa. SCV-projektet (Site Characterization and Validation) har pågått under fem års tid där ett av huvudsyftena har varit att utveckla metoder för modellvalidering. Härvid har prediktioner gjorts baserat på olika koncept och spår försök har använts för verifiering/validering av modellerna. Ett av försöken bestod i ett kombinerat spår försök och radarmätning där transporten och flödesfördelningen studerades i en lokal sprickzon före och efter utbrytning av en ort. Försöken gjordes så att en saltlösning injicerades i en sprickzon varefter radarmätningar gjordes vid olika tillfällen. Härigenom kunde saltvattnets transport i zonen följas i olika tidssteg. I samma sprickzon utfördes sedan ett spår försök med en lägre flödesgradient. I detta försök injicerades 12 olika spårämnen i 9 olika punkter på 15-25 m avstånd från orten. Båda dessa försök visar att den störda zon som bildas runt en ort har en stor betydelse för transporten i ortens närområde samt att transporten är koncentrerad till ett fåtal preferentiella flödesvägar.

Fördelningen av flödesvägar har också studerats i en mindre skala i en enskild spricka. En serie av hydrauliska tester och spår försök har utförts längs ett sprickplan. Försöket indikerar att i genomsnitt 25%, eller mindre, av ett sprickplan är öppet för flöde och att flödet är fördelat i kanaler med vidder från millimeter upp till decimeter vilka i sin tur uppträder i samlingar av några decimeters vidd.

### *Finnsjön*

De storskaliga försöken i en högkonduktiv flack sprickzon i Finnsjön har avslutats. En serie av interferenstester, radiellt konvergerande spår försök och dipolförsök har utgjort grunden för ett omfattande modelleringsarbete som fortfarande pågår inom ramen för INTRAVAL-projektets Fas 2. Den stora mängd bakgrundsdata som finns från Finnsjön har gjort att indata för modellering med många olika koncept har kunnat göras. Förutom den porösa kontinuum modellen med enbart advektion och dispersion, har även modeller med matrixdiffusion, kanalströmning och stokastiska modellansatser gjorts.

Försöken i Finnsjön visar att heterogeniteten är betydelsefull även i denna stora skala samt att transporthastigheten kan variera avsevärt i olika riktningar.

### *Äspö*

I förundersökningarna för Äspölaboratoriet har spår försök med vattentrogna ämnen ingått. Syftet har dels varit att verifiera den konceptuella modellen över området men också att bestämma transportparametrar för olika sprickzoner. Försöket föregicks därför av prediktioner av förväntade avsänknings och transporttider.

Ett konvergerande storskaligt försök utfördes genom att pumpa i ett centralt beläget borrhål och tillsätta spårämnen i sex punkter i olika zoner på 100–400 m avstånd från pumphålet. Försöket visade att flödesporositeten (vilket är ett mått på hur stor andel av den totala volymen av en geologisk enhet, t ex en sprickzon, som omfattas av transporten), varierar avsevärt mellan olika zoner trots att zonerna har ungefär samma vattengenomsläpplighet (transmissivitet). Försöket visar också att konnektionen mellan olika zoner spelar stor roll för transportfördelningen i bergmassan. Försöket bekräftar också slutsatsen från Finnsjönförsöken att transportegenskaperna i sprickzonen varierar i olika riktningar.

Enhålsförsök i form av utspädningsmätningar används också i olika skeden av byggandet i syfte att studera förändringar i grundvattenflödet samt för att verifiera numeriska modellprediktioner.

### *Spårämnen*

I varje spår försök som utförs är valet av spårämnen mycket viktigt. Spårämnen som visat sig vara mycket lämpade för storskaliga försök med snabba transporttider kan vara olämpliga för försök i tätt berg med långa kontakttider. En ytterligare komplicerande faktor är att spårämnena kan finnas kvar mycket länge och därför störa framtida försök. Detta är speciellt viktigt i Äspölaboratoriet.

### **Naturliga analogier**

I samarbete med England (UK DOE), Schweiz (NAGRA), USA (US DOE) och Brasilien genomfördes undersökningar av naturliga analogier till frigörelse och transport av radionuklider. Projektet startades i maj 1986 och avslutades i mars 1990. Poços de Caldas-projektet beskrivs i kapitel 8.

Sedan april 1989 deltar SKB tillsammans med AECL (Kanada) och US DOE i Cigar Lake-projektet. Medverkan avser i första hand en treårsperiod.

SKB har även medverkat i en rekognoseringsundersökning av naturliga reaktorer i Gabon. Detta ingår i Oklo-projektet som leds av franska CEA med stöd från CEC. Såväl Cigar Lake som Oklo behandlas i kapitel 8.

Utöver den direkta medverkan i analogprojekten genomförs stödjande undersökningar så som utveckling av modeller för kemisk transport, geokemiska förändringar och radionuklidkemi i grundvattnet.

### **In-situ experiment**

Äspölaboratoriet gör det möjligt att utföra experiment under de kemiska förhållanden som råder i berggrunden. Inför starten av Äspöprojektet identifierades en serie försök med följande mål:

- Pröva upplösning och migration av radionuklider in situ.
- Validera modeller och kontrollera konstanter som används för att beskriva radionuklidens upplösning i grundvatten, inverkan av radiolys, bränslekorrosion, sorption på mineraler, diffusion i bergmatrisen, diffusion i återfyllnadsmaterial, uttransport ur en skadad kapsel och transport i en enskild bergspricka.
- Speciellt pröva inverkan av naturliga reducerande förhållanden på löslighet och sorption av radionuklider.
- Pröva grundvattnets förmåga att ta upp och transportera radionuklider med naturliga kolloider, humusämnen och fulvosyror.
- Undersöka bakteriers inverkan på kemiska förhållanden och radionuklidmigration.
- Materialprovning och kemisk inverkan av injekterings- och återfyllnadsmaterial så som bentonit och cement.

Laboratorieundersökningar med den här inriktningen har pågått under en tioårsperiod. De experiment som planerats har därför i vissa fall mer karaktär av demonstration än kunskapsinhämtning. De är trots det väl motiverade eftersom det är i praktiken omöjligt att i laboratoriet exakt efterlikna förhållandena i berget.

## **7.3.3 Forskningsprogram 1993–1998**

### **Laboratieförsök**

Experimenten med radionuklidmigration i vattenförande sprickor i borrhälsar fortsätter. De två olika typerna av experiment dvs radionuklidförsök och flödesexperiment pågår parallellt.



Utrustning för senare in-situförsök med radionuklider utvecklas och skall provas i laboratoriet. Ökande insatser på det här området förutses.

## Spårförsök

### *Vattentrogna spårämnen*

Vattentrogna spårämnen används för att validera grundvattenflödesmodelleringen som baseras på hydrauliska parametrar. Spårförsök av detta slag kan i princip göras i vilka skalor som helst men måste ofta begränsas pga att transporttiderna blir mycket långa, även om det är fråga om korta avstånd under forcerade förhållanden. Därför kommer denna typ av spårförsök att fokuseras på specifika punkter där man vill bekräfta att en snabba transportvägar förekommer. Trots att resultatet eventuellt visar att inget spårämnesgenombrott kunnat detekteras kan det vara en styrka att kunna visa att transporttiderna inte underskattats, se bilaga A i Underlagsrapport till FUD-program 92 angående Äspölaboratoriet /7-51/.

Radioaktiva vattentrogna spårämnen har använts vid två storskaliga fältförsök, det ena i Finnsjön (dipolförsöket) och det andra på Äspö (LPT-2). I båda fallen användes kortlivade isotoper med halveringstider varierande från några timmar till två månader. Det finns planer att i framtiden använda radioaktiva spårämnen på Äspö efter att tunnelarbetena avslutats. Syftet kommer då att vara att validera vattentransporttider för specifika flödesvägar /7-51/.

I undersökningssyfte kan stabila spårämnen användas för att bestämma konnektiviteten mellan t ex olika borrhålssektioner och tunneln under själva byggfasen. Liknande insatser har gjorts inom ramen för de geohydrologiska undersökningarna i sprickzonen NE-1 i Äspötunneln. Erfarenheterna och de preliminära resultaten talar för att liknande insatser kommer att göras även i fortsättningen av utbyggnaden.

### *Naturliga spårämnen*

För att i stor skala utnyttja spårförsök för validering av transportmodeller måste försöken pågå under mycket lång tid. Under naturliga ostörda förhållanden är därför de naturligt förekommande spårämnena användbara. Av de i vattnet lösta konstituenterna är klorid, tritium, syre-18, kol-14 och svavel-34 de till synes bästa. På Äspö har samtliga dess utnyttjats för att förklara grundvattnets ursprung och historia, se avsnitt 7.1.2. Resultaten är kvalitativa om än detaljerade. Detta beror på att det snabbt blir svårt att avgöra när i tiden en viss process startat och hur den senare utvecklats, t ex när Äspövattnet blev salt.

För att i stor skala validera grundvattentransportmodeller map snabba transportvägar är tritium mest användbart. Under hela drivningsskedet provtas grundvatten för analys av tritium. Eftersom signifikanta tritiumhalter visar på en inblandning av modernt vatten (yngre än 35 år) är punkter där dessa eventuellt erhålls ett tecken på en relativt snabb flödesväg.

Inom ramen för det grundvattenkemiska dokumentationsarbetet analyseras ett flertal komponenter som tillsammans kan användas för att tolka erhållna tritiumdata, bl a de tidigare nämnda syre-18, kol-14, svavel 34 och huvudkomponenter.

### *Sorberande spårämnen*

Liksom de vattentrogna spårämnena kan de sorberande vara antingen stabila eller radioaktiva. De sorberande spårämnena används i första hand som modell för hur radionuklider från ett läckande förvar kan transporteras med grundvattnet. Till skillnad från de vattentrogna spårämnena är deras förflyttning endast svagt beroende av

grundvattenflödet. Långt viktigare är faktorer som spårämnenas benägenhet att fastna på mineralytor och dessa ytors storlek.

Vätt yta är ett mått på hur stor den reaktiva ytan är. Den våta ytans storlek påverkar all växelverkan mellan berget och vattnet. Inom ramen för det redan pågående redoxexperimentet skall olika försök att bestämma den våta ytan genomföras, se /7-51/. I syfte att i detalj karakterisera transporten av cesium och strontium kommer dessa ämnen att injiceras under en lång tid i lämplig spricka som senare bryts ut för analys, se /7-51/.

Extremt svagt sorberande spårämnen kan användas i spår försök över sträckor på 1–10 meter. Resultaten av dessa kan användas för att beskriva transport i det goda bergets nätverk av småsprickor (kanalnätverk), se närmare i /7-51/. För att genomföra dessa försök krävs en utprovning av lämpliga spårämnen. Kunskapen om användbara extremt svagt sorberande spårämnen är ringa. Planer finns på att testa tänkbara kationer i batch och kolonn försök på lab. Dessa kommer att föregå fält försöken.

### **In-situ experiment**

För att kunna genomföra experimenten med radionuklider in-situ utvecklas ett borrhålsinstrument, CHEMLAB. Sonden består av två delar. Den ena delen utgörs av geokemisonden som mäter pH, Eh, ledningsförmåga, etc. Den andra delen är ett automatiskt kemiskt laboratorium där en rad olika experiment kan utföras. Inget vatten från sonden går till berget, vilket innebär att man kan använda radionuklider i sonden.

Utvecklingen av CHEMLAB-sonden har påbörjats, I samarbete med det franska CEA konstrueras den del av sonden där försöken utförs och prov samlas in. CHEMLAB är en vidareutveckling av den franska sonden FORALAB. Den del som mäter vattensammansättningen finns redan (CHEMMAC). Utrustningen beräknas kunna tas i bruk under 1994.

#### *I sonden*

En serie experiment har föreslagits. Listan är tills vidare provisorisk, men den tjänar som vägledning för konstruktion av CHEMLAB, anskaffning av kringutrustning samt förberedelse av tillstånd att hantera små mängder radionuklider.

#### *I kemilaboratoriet*

Sådana experiment görs som komplement till experimenten i sonden; dels upprepning av försöken i kontrollsyfte och dels analys av kolloider, mikrober, humus- och fulvosyror, liksom test av dessa aggregats förmåga att ta upp och transportera radionuklider.

#### *Ute i sprickzonen och berget*

Kompletterande försök kan även utföras ute i berget. De kompletterande experimenten planeras först när resultaten från motsvarande försök i byggnadsfasen är genomförda (se redoxförsöken).

Indiffusion av sorberande nuklider i bergets mikroporer prövas genom att injicera sorberande inaktiva isotoper, t ex inaktivt cesium och strontium tillsammans med icke sorberande spårämnen i ostörda partier i berget.

Experimenten som ska utföras i sonden och ute i sprickzonen förbereds genom laborieförsök. I anslutning till de laborieförsöken utvecklas försöksupställningar som går att flytta in i sonden och anslutas till den. Längst har planering och utveckling hunnit beträffande diffusionsförsök, migration i bergsspricka och radiolys.

Såväl utrustningstester som förberedande experiment skall utföras. Nya material prövas med sikte på att använda dem i sonden.

### **Naturliga analogier**

En del i Cigar Lake-projektet avslutas under 1992 och en avrapportering genomförs. SKBs fortsatta engagemang i projektet kommer att avgöras med ledning av resultaten. De insatser som för närvarande görs för Oklo-projektet med stöd av SKB kommer att utvidgas något mot slutet av 1992.

SKB följer Aligator Rivers-projektet, ARAP, genom deltagande i INTRAVAL-projektet där resultat från ARAP behandlas. Vidare deltar SKB som observatör i analogiprojekten i Palmottu, Finland, och Maqarin, Jordanien, som avser undersökningar av en uranmineralisering i granit respektive hyperalkaliska grundvatten.

Beträffande naturliga analogier, se vidare kapitel 8.

## **7.4 ÖVRIGT**

### **7.4.1 Sprickzonsprojektet**

Större sprickzoner har stor betydelse för utplaceringen av ett djupförvar. För att underlätta säkerhetsanalysen placeras ett tänkt förvar med ett respektavstånd till närmaste större sprickzoner. Syftet med sprickzonsprojektet är att lära känna dessa zoners (transport)egenskaper så väl att respektavståndet kan optimeras. Ifall zonernas retarderande egenskaper motverkar eventuell högre vattenflödes hastighet kommer zonerna inte att utgöra en större risk för spridning av nukliderna än det omgivande berget.

Sedan 1984 har en flack starkt vattenförande zon i Finnsjön undersökts. Resultaten har sammanställts i ett stort antal rapporter och publikationer. Kunskapen från undersökningarna har successivt använts i SKBs övriga verksamhet, bl a på Äspö och i SKB 91-analysen.

Efter den inledande fasen av undersökningarna fann man att den flacka zonen utgör gräns mellan salt och sött vatten. Att förstå mekanismerna bakom detta blev därefter en väsentlig del av det fortsatta arbetet.

Undersökningarna i Finnsjön har nu avslutats. Under den kommande perioden görs en slutrapportering av sprickzonsprojektet. Eftersom alla resultat och tolkningar redan avrapporterats är slutrapportens syfte att summera det som gjorts och hänvisa till tidigare sammanställningar.

### **7.4.2 Kemisk toxicitet**

Det väsentliga forskningsarbetet berör avfallets radiologiska toxicitet. Det är pga detta som olika former av inneslutande förvar byggs. Man kan dock konstatera att en liten del av det radioaktiva materialet som innesluts skulle klassas som kemiskt avfall ifall det inte vore radioaktivt.

En inventering har gjorts av de kemiska grundämnen som finns i ett förvar för utbränt bränsle. Mängder och eventuell giftighet har sammanfattats /7-50/. Inför en slutlig säkerhetsredovisning ingår även att redovisa kemiska hälsorisker på motsvarande sätt som skett i SFR. Emellertid visar inventeringen att de kemotoxiska konsekvenserna av slutförvaring av svenskt radioaktivt avfall blir små eller försumbara.

## 8 NATURLIGA ANALOGIER

Säkerhetsanalysen skall vara giltig för hundratusentals år. Det går inte att utföra försök i den tidsskalan, inte ens s k accelererade försök. Långsamma processer, med betydelse för den långsiktiga säkerheten skulle i sämsta fall kunna undgå observation. Ett sätt att kringgå denna svårighet är att förlita sig på fysikaliska lagar, t ex termodynamiska begränsningar. Ett annat sätt är att göra observationer av naturliga fenomen där förhållandena är likartade och tiden för skeendet jämförbar.

Det senare benämns ”studier av naturliga analogier till djupförvaring av radioaktivt avfall” och omfattar såväl undersökningar av arkeologiska fynd som geologiska bildningar. Enligt en definition av IAEA hänför man till naturliga analogier, ”experiment i naturen som inte är kontrollerade av människan”.

### 8.1 POÇOS DE CALDAS

Målsättningen för Poços de Caldas-projektet har varit att undersöka de processer som styr frigörelse och transport av radionuklider med grundvattenflödet. Två platser med höga naturliga halter av radionuklider och radionuklidliknande ämnen valdes för ändamålet – en torium-lantanidmineralisering i Morro do Ferro och en uranförekomst i gruvan Osamu Utsumi. Båda platserna ligger nära staden Poços de Caldas i Minas Gerais, Brasilien. Båda malmkropparna ligger relativt nära markytan och i en zon av intensiv vittring och grundvattengenomströmning.

Poços de Caldas-projektet startades i maj 1986 och pågick till mars 1990. Deltagare i projektet har varit SKB, UK DoE (Storbritannien), NAGRA (Schweitz), US DOE (USA) och en rad brasilianska organisationer så som Federala Universitetet i Rio de Janeiro, Katolska Universitetet i Rio de Janeiro, Katolska Universitetet i Sao Paulo, CNEN och URANIO DO BRASIL. Projektet leddes och samordnades av SKB.

De undersökningar som utförts finns redovisade i tekniska rapporter, föredrag och publikationer /8-1 till 8-27/. Alla resultaten och deras betydelse för säkerhetsanalysen finns sammanfattat i en teknisk rapport /8-28/. Slutsatserna kan grovt sammanfattas i följande punkter:

- Urandioxid (uraninit, pechblände) är stabil under naturliga reducerande förhållanden. Den fälls ut efter reduktion då sexvärt löst uran kommer ut i berget. Bildningen respektive upplösningen av en pechbländenodul sker med en hastighet på några centimeter per miljon år. Plutonium förekommer naturligt och är stabilt i urannodulerna.
- Den geokemiska modell som används för att beskriva grundvattnets redoxegenskaper på förvarsdjup är generellt tillämpbar och bekräftas genom mätningarna vid lägre pH i Poços de Caldas.
- Prediktiva geokemiska modellberäkningar som gjorts av olika grupper visar att man vanligtvis överskattar löslighet av radionuklider och spårmetaller. Det går mao bra att beräkna lösligheten utan att riskera underskattningar. Speciering av radionuklider och spårmetaller, dvs vilka komplexjoner som bildas i vattnet, är svårare att beräkna på ett invändningsfritt sätt.
- Redoxfrontens utbredning och utfällning av uran vid redoxfronten kunde väl efterliknas med beräkningsmodeller som kopplar reaktion och transport. Beräk-

ningsresultaten har föranlett en utveckling av modellerna – och i ett fall – korrektion av databasen.

- ”Kanalbildning” och ”matrisdiffusion” bekräftades genom simulerande modellberäkningar av formen på redoxfrontens yta.
- Medfällning kunde tydligt iakttas vid redoxfronten men det var inte möjligt att modellbehandla detta. Det kräver utveckling av modeller.
- Kolloider och löst organiskt material finns i höga halter i de ytnära grundvattnen i Poços de Caldas. Radionuklider och spårmetaller tas kraftigt upp av de kolloidala partiklarna, men någon nämnvärd kolloidtransport sker inte. Halten och arten av kolloider på djupet liknar det vi finner i våra grundvatten. De kolloidburna spårmetallerna står i jämvikt med det djupa grundvattnet.
- Mikrober deltar i de geokemiska reaktionerna.
- Magmaintrusion i uranmineraliseringen i Osamu Utsumi har orsakat hydrotermal transport av uran. Det kunde efterliknas med modellberäkningar. Man kunde då bl a konstatera att uranlöslighet vid höga temperaturer (300°C) är mycket dåligt känd. Vidare fann man att låg hydraulisk konduktivitet i berget är ett bra skydd mot negativa effekter av hydrotermal transport, dvs upplösning av mineral och använt bränsle.

De slutsatser som direkt använts för att stödja nya säkerhetsanalyser är dels bekräftelsen på järnmineralens redoxkontroll och dels konstaterandet att kolloider inte bidrar på något avgörande sätt till migrationen av radionuklider.

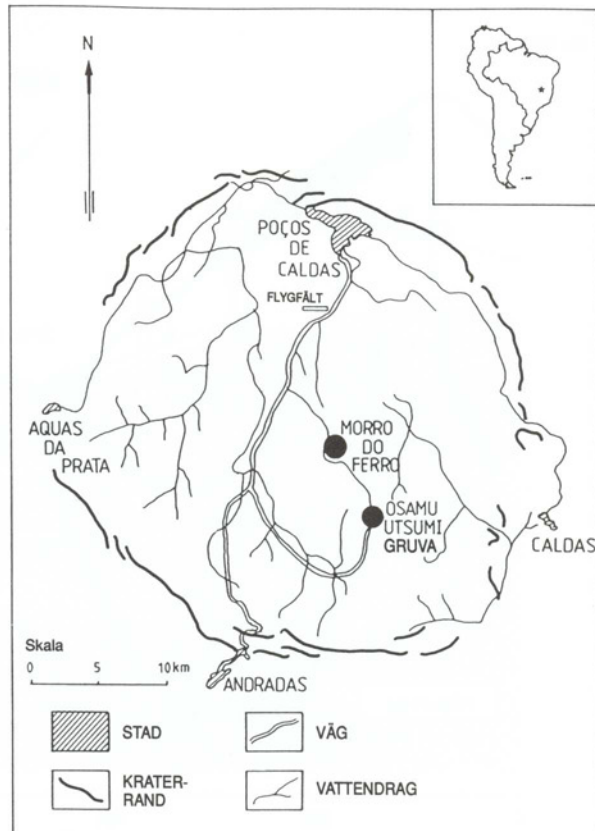
### 8.1.1 Områdets geologi

Såväl Morro do Ferro som Osamu Utsumi ligger inom en vulkanisk caldera med en diameter på 30 km, se Figur 8-1. Den bildades för 75 miljoner år sedan. De vanligaste bergarterna inom calderan är nefelinsyeniter och fonoliter rika på kalium. Bergarterna hade relativt höga halter av uran, torium och lantanider. Senare bildades lokala koncentrationer av de här ämnena genom de hydrotermala aktiviteterna i området och malmkroppar bildades.

Idag ligger Poços de Caldas calderan 1500 m över havsytan, vilket är ca 500 m lägre än tiden efter att den bildats. På 50 miljoner år har den eroderat 6 till 7 m/Ma. Dränagemönstret har under den tiden inte ändrats så mycket. Vittringshastigheten har uppskattats till 12 m/Ma under de senaste 10 miljonerna år.

Morro do Ferro bildar en 140 m hög kulle med en diameter på ungefär en kilometer, se Figur 8-2. Två bäckar avvattnar kullen. Malmkroppen är ca 150 m bred, 320 m lång och sträcker sig mellan 30 och 100 m ned från markytan. Den är belägen på ena sidan, ganska nära toppen av kullen och innehåller ungefär 30 000 ton torium, 50 000 ton lantanider och även något uran, se Figur 8-3. Halterna i malmen är 0,5 – 10 g torium och lantanider och 20 – 60 mg uran per kg. Torium förekommer som korn av olika mineral: torit, torianit, cerianit, cherialit och torbastnäsit. Lantanider och uran ingår i en del av toriummineralen. Torium och uran förekommer dessutom tillsammans med järnhydroxider eller lerpartiklar täckta med järnhydroxider. Nära markytan har cerium oxiderats till Ce(IV) och ingår i mineralet cerianit. Djupare ner har trevärda lantanider bildat sekundära mineral så som neodymiumlantaniit /8-25/.

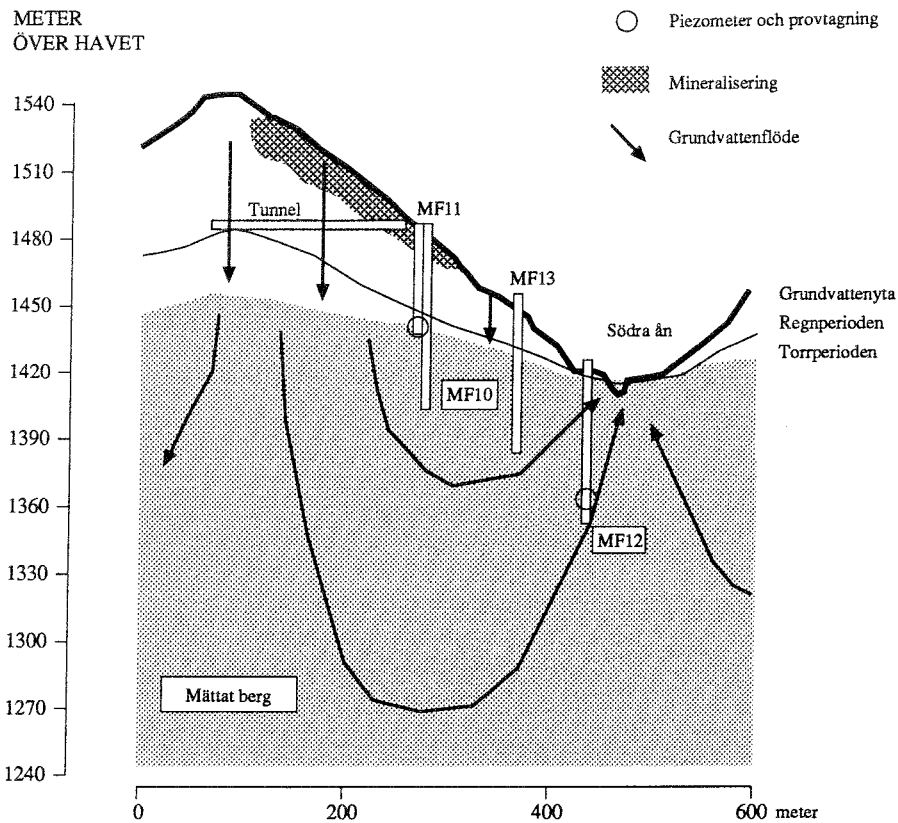
Morro do Ferro är helt vittrat ned till 100 m djup och är även påverkat längre ned. Den uppmätta hydrauliska konduktiviteten är  $10^{-5}$  till  $10^{-6}$  m/s i det vittrade berget vilket skall jämföras med  $10^{-7}$  till  $10^{-9}$  m/s i omgivande fonolit. En redoxfront påträffades 36 m ned i ”färsk” fonolit som i sin tur återfanns på 28 m i ett vertikalt borrhål vid foten av kullen. Grundvattenytan ligger åtminstone 80 m under toppen av kullen.



**Figur 8-1.** Undersökningsplatserna Osamu Utsumi och Morro do Ferro inom Poços de Caldas calderan.



**Figur 8-2.** Morro do Ferro.



Figur 8-3. Profil genom Morro do Ferro.

Malmkroppen har undersökts på femtio- och sextioalet. Bl a gjordes en tunnel in genom malmkroppen. För mätningarna och provtagningarna inom projektet borrades totalt fyra nya vertikala borrhål på mellan 40 och 75 m.

Urangruvan Osamu Utsumi har varit i drift sedan 1975. Den är ett dagbrott som täcker två kvadratkilometer, se Figur 8-4. Berget består av hydrotermalt omvandlad fonolit och nefelinsyenit. Den hydrotermala omvandlingen är orsakad magmatiska intrusioner som har efterlämnat två stora brecciarör. Utom uran finns även påtagliga mängder av torium, lantanider, molybden och zirkonium.

Den övre delen av berget är kraftigt vittrat med bildning av laterit. Längre ned har oxiderande grundvatten från ytan orsakat bildningen av en redoxfront, se Figur 8-5. Den är tydligt urskiljbar som en färgförändring från gulbrunt oxiderat berg till gråblått ännu opåverkat av syre. Uranet är anrikt i redoxfronten, se Figur 8-6. Uran förekommer dels som noder av pechblände och dels sorberat i järnhydroxider.

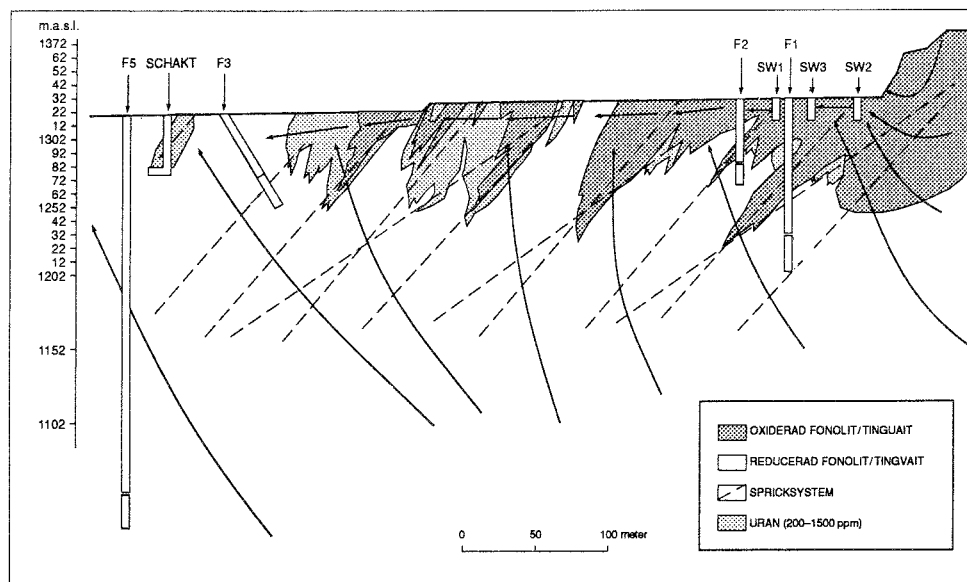
En rad mineralfaser i den reducerade fonoliten är förbundna med torium och sällsynta jordartsmetaller: monazit, cherialit (vanligast), bastnäsit, crandallit, florencit, goceixite och goyazit. De flesta sällsynta jordartsmetaller visar en tendens att lakas ut ur den oxiderade fonoliten och anrikas i det reducerande partiet nära fronten. Undantagen är Eu och Ce som tenderar att anrikas i den oxiderade delen.

Tre grunda och fem djupa hål borrades inom ramen för projektet. Det djupaste borrhålet gick ned till ca 300 m. Borrhålen användes för mätningar och provtagningar. Den uppmätta hydrauliska konduktiviteten nere i berget låg mellan  $10^{-5}$  och  $10^{-8}$  m/s. Det tredimensionella grundvattenflödet före och efter tillkomsten av dagbrottet



*Figur 8-4. Dagbrottet i Osamu Utsumi.*





Figur 8-5. Geologi och undersökta borrhål i Osamu Utsumi urangruva.

Tabell 8-1. Representativa grundvattenanalyser från Osamu Utsumi urangruva och Morro do Ferro. Alla koncentrationer i mg/l och  $E_h$  i mV.

	OSAMU UTSUMI		MORRO DO FERRO	
	F1	F2	F4	MF12
Kod	[Select]	PC-GW-78	PC-GW-80	PC-GW-50
Datum	870707	890320	890413	880614
T °C	22	21	24	21
pH (fält/lab)	4.87/4.06	5.90/6.42	5.83/6.38	5.99/6.19
$E_h$	338	191	462	212
Alkalinitet	2.0	10	23.5	22
Ca	0.47	2.65	7.88	8.48
Mg	0.07	0.07	0.46	0.70
Sr	0.043	0.009	0.20	0.346
Ba	0.125	0.13	0.12	
Na	0.20	0.2	0.63	0.84
K	12.7	13.5	11.8	11.2
Fe(II)	1.30	1.67	6.13	0.74
Fe(III)	1.33	1.70	6.27	0.79
Al		0.319	0.183	0.21
Mn	0.19	0.318	0.13	1.68
Zn	0.083	0.211	2.17	0.27
SO <sub>4</sub>	16	14	28	9.5
F	0.41	2.57	6.0	5.3
Cl	3.0			
Br	0.04			
SiO <sub>2</sub>	35	29	34	33.4



*Figur 8-6. Fonolit från urangruvan Osamu Utsumi i Poços de Caldas. Man ser den skarpa gränsen mellan oxiderat berg (gråbrunt) och alltjämt reducerande (grått). De svarta nodulerna på den reducerande sidan är uranmalmen pechblände.*

simulerades med modellberäkningar. Dagbrottet, som är mycket omfattande, har naturligtvis ändrat flödesfältet jämfört med vad som gällde då malmen bildades.

### 8.1.2 Grundvattenkemi

Grundvattnet i Morro do Ferro och Osamu Utsumi innehåller relativt lite karbonat. Istället så är sulfat vanligt och i Osamu Utsumi dominerar sulfat över karbonat, se Tabell 8-1. Kalium är den vanligaste katjonen följd av kalcium. Vattnen är relativt unga och den totala halten av lösta ämnen låg.

Vattnets sammansättning förklaras av den relativt snabba infiltrationen av oxiderande meteoriskt vatten. Berggrunden, speciellt i urangruvan är rik på pyrit som av det infiltrerande vattnet oxideras till järnhydroxid. Samtidigt bildas sulfat och vätejoner. Kaliumfältspat reagerar med vätejoner och vittrar till kaolinit samtidigt som kalium frigörs. Det är den här reaktionen som sker i redoxfronten och som undersökts främst i urangruvan men även i Morro do Ferro. Reaktionerna leder till bildning av järnhydroxid, kaolinit och ett vatten med lågt pH där kalium och sulfat är de dominerande jonlagen. De här reaktionerna kunde efter en del initialsvårigheter simuleras med geokemiska modellberäkningar. Beräkningarna genomfördes för att beskriva redoxfrontens utbredning som en funktion av tiden.

Noggranna mätningar av pH och redoxpotentialen genomfördes i fält. I ett slutet system pumpades grundvatten från vattenförande sektioner i borrhålen som isolerats

med gummimanschetter till mätutrustning på markytan. Samma utrustning har tidigare använts för grundvattenkemisk provtagning på undersökningsområden i Sverige. Redoxpotentialen är betydligt högre än i svenska grundvatten. I en del av fallen beror detta på att syre finns kvar i vattnet. Det gäller speciellt provtagningspunkter nära markytan. Då vattnet är syrefritt kontrolleras redoxpotentialen av halten tvåvärt järn, som är hög, pH och jämvikt med järnhydroxid. Det är samma förhållanden som konstaterats i våra grundvatten men i Poços de Caldas är pH lägre varför Eh blir högre. Modellen som relaterar de uppmätta värdena på Eh i djupa grundvatten till pH och halten tvåvärt järn är betydelsefull för djupförvaring av radioaktivt avfall. Mätningarna i Poços de Caldas bekräftar modellens allmängiltighet.

Analys av tritium, deuterium och syre-18 bekräftar att grundvattnet är meteoriskt och att vattenomsättningen är snabb. Såväl torium-lantanidmineraliseringen som uranmalmen utsätts för höga vattenflöden och aggressiv vattenkemi om man jämför med förhållanden som råder i ett djupförvar.

### 8.1.3 Radionuklider och spårmetaller

Datorprogram för termodynamiska beräkningar används i allt ökande utsträckning för att förutsäga löslighet och speciering av radionuklider från radioaktivt avfall. För att pröva användbarheten av sådana här modeller engagerades fem olika grupper för att ovetande om analysresultaten räkna fram koncentrationer av olika spårämnen i grundvattnet. De här grupperna använder delvis olika databaser med termodynamiska konstanter. Utgångsvärdena bestod av den uppmätta vattenkemin utom de utvalda spårelementen samt bergets och malmernas mineralogiska sammansättningar. De element som prövades i beräkningarna var U, Th, Pb, V, Ni, Sn, Se, Sr, Ra, Mn, Al and Zn.

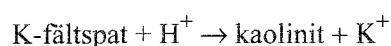
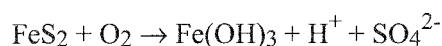
I allmänhet erhöles beräknade värden som var jämförbara med de uppmätta halterna. Som regel överskattades lösligheten vilket med tanke på användningen i säkerhetsanalyser är det bättre alternativet. I endast två fall underskattades lösligheten. Det var för Ni och Zn när järnhaltiga mineral antogs som löslighetsbegränsande faser. Skall man använda sig av de här mineralen som löslighetsbegränsande fas i något sammanhang behöver man först visa att de bildas. Den bästa överensstämmelsen mellan beräknad och uppmätt löslighet erhöles för Th, Pb och Al.

Den lägre än beräknade lösligheten kan bero på att löslighetsbegränsande mineral saknas i databasen t ex goyazit för Sr eller att konstanterna är onödigt försiktigt valda t ex för U. Andra möjliga anledningar till låga koncentrationer är medfällning och sorption på järnhydroxidfaser eller att löslighetsjämvikt inte uppnåtts för alla elementen trots långa kontakttider och riklig förekomst som mineral.

### 8.1.4 Redoxfronten

Redoxfronten i Osamu Utsumi är mycket tydligt utbildad och kan följas i såväl dagbrottet som borrhål från markytan. Uranmalmen är koncentrerad till redoxfronten och man har därför karterat ytan av fronten i samband med brytningen.

De geokemiska och mineralogiska förändringarna kring redoxfronten har studerats ingående inom analogiprojektet. Reaktionerna som bildar fronten kan sammanfattas i följande formler:



Fronten rör sig med en hastighet på ungefär 10 m per miljon år. Uran anrikas vid fronten och pechblände faller ut som svarta noder på den reducerande sidan av fronten, se Figur 8-6. De här nodulerna löses åter upp då fronten avancerat ytterligare och passerat dem. Bildningen och upplösningen av nodulerna sker med en hastighet på några centimeter per miljon år enligt isotopmätningarna. Uran anrikas även genom att tas upp då järn(III)hydroxiden bildas.

Enkla massbalansberäkningar har utförts. Utgår man från att 100 mm syresatt vatten infiltrerar per år och att den befintliga pyriten fullständigt oxideras så blir frontens hastighet 25 m per miljon år vilket kommer den uppmätta hastigheten på 10 m/Ma tämligen nära.

Redoxfronten bildar ingen jämn plan yta utan sträcker sig ner längs hydrauliska ledare i berget. Resultatet blir en ”taggig” gränssyta mellan redan oxiderat och alltjämt reducerande berg. Genom att utgå från advektion och diffusion som transportprocesser för syre i grundvattnet och anta att flödet är koncentrerat till delar av öppna konduktiva vertikala sprickor så kunde frontens utseende simuleras med modellberäkningar. Detta demonstrerar på ett övertygande sätt förekomsten av transportfenomen som ”kanalbildning” och ”matrisdiffusion”.

Den detaljerade geokemiska modelleringen av redoxfronten har utförts med datorprogrammen CHEQMATE och CHEMTARD. De här beräkningsprogrammen kopplar kemisk jämvikt med transport. Den skarpa redoxövergången kunde efterliknas i beräkningarna och frontens beräknade hastighet överensstämde med den uppmätta. Svårigheterna att erhålla korrekta pH värden i den första omgången beräkningar föranledde en förbättring av databasen HATCHES som ingår i CHEQMATE /8-27/.

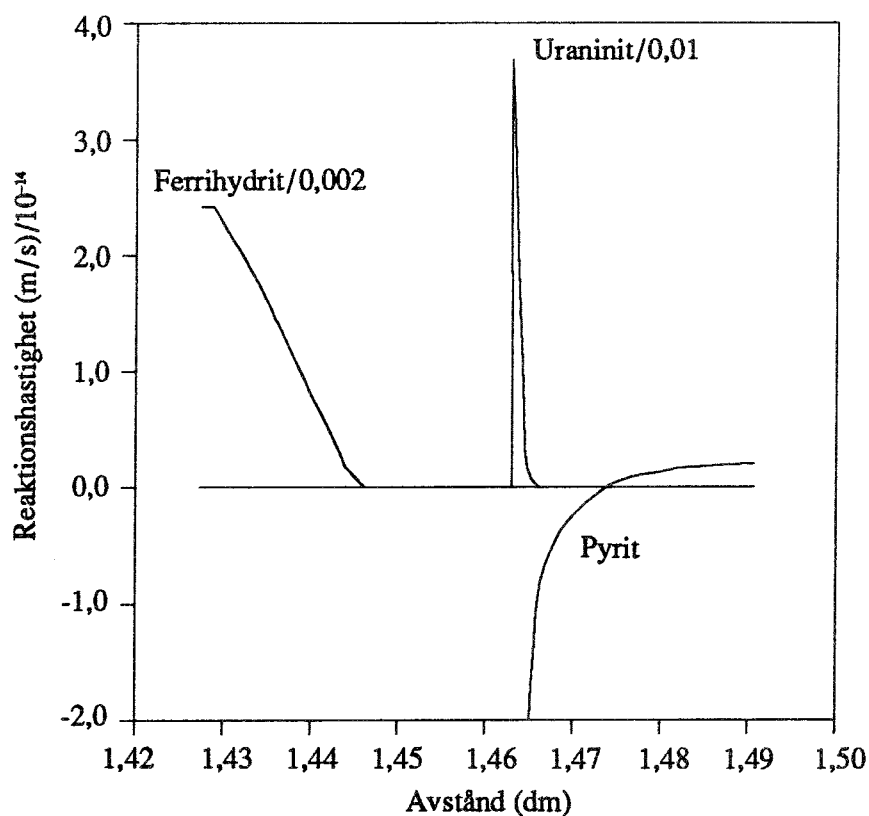
En annan modell prövades också. Den har utvecklats av Lichtner /8-29/ och beskriver de geokemiska reaktionerna med pseudokinetiska hastighetsuttryck. Beräkningsmetoden är snabb och skarpa redoxfronter kan simuleras utan svårigheter /8-26/, se Figur 8-7.

Reaktionerna vid redoxfronten och dess förflyttning simulerades med de kopplade modellerna. Transport av uran och utfällning av uran på den reducerande sidan kunde likaså efterliknas i beräkningarna. Fixeringen av bl a uran till järnhydroxidfaser på den oxiderande sidan sökte man simulera med CHEMTARD som även kan inkludera ytadsorption. Autoradiografiundersökningar visar emellertid att det rör sig om medfällning vilket inte ingår i modellerna.

### 8.1.5 Medfällning

Utom uran anrikas även ett flertal andra element vid redoxfronten. Det gäller även t ex cesium som själv inte påverkas av redoxförändringar, se Figur 8-8. I flera av de här fallen rör det sig uppenbarligen om medfällning. Inte ens uran anrikas enbart genom reduktion till pechblände. En del av uranet tas upp i den järn(III)hydroxid som bildas efter att fronten har passerat. Det fanns vid tillfället då projektet utvärderades inga transportmodeller som inkluderade medfällning. Det saknades också data som beskrev upptaget av spårämnen i de mineralfaser som bildats. Överhuvudtaget var det oväntat att effekten var så påtaglig.

Eftersom medfällning är i det närmaste irreversibel, åtminstone för de mycket långa tider det skulle krävas för mineralen att omvandlas eller för diffusion i det fasta materialet, så kan det vara en värdefull barriär i ett djupförvar för radioaktivt avfall. Tänkbara anledningar till medfällning i ett djupförvar är t ex korrosion av kapslingsmaterial speciellt järn, utfällning av kalcit, omvandling av cement och reaktioner mellan cement och grundvatten (i den mån cement används).



*Figur 8-7. Den beräknade hastigheten för bildning av järn(III)hydroxid, utfällning av urandioxid och förbrukning respektive utfällning av pyrit tvärsöver en redoxfront i Osamu Utsumi.*

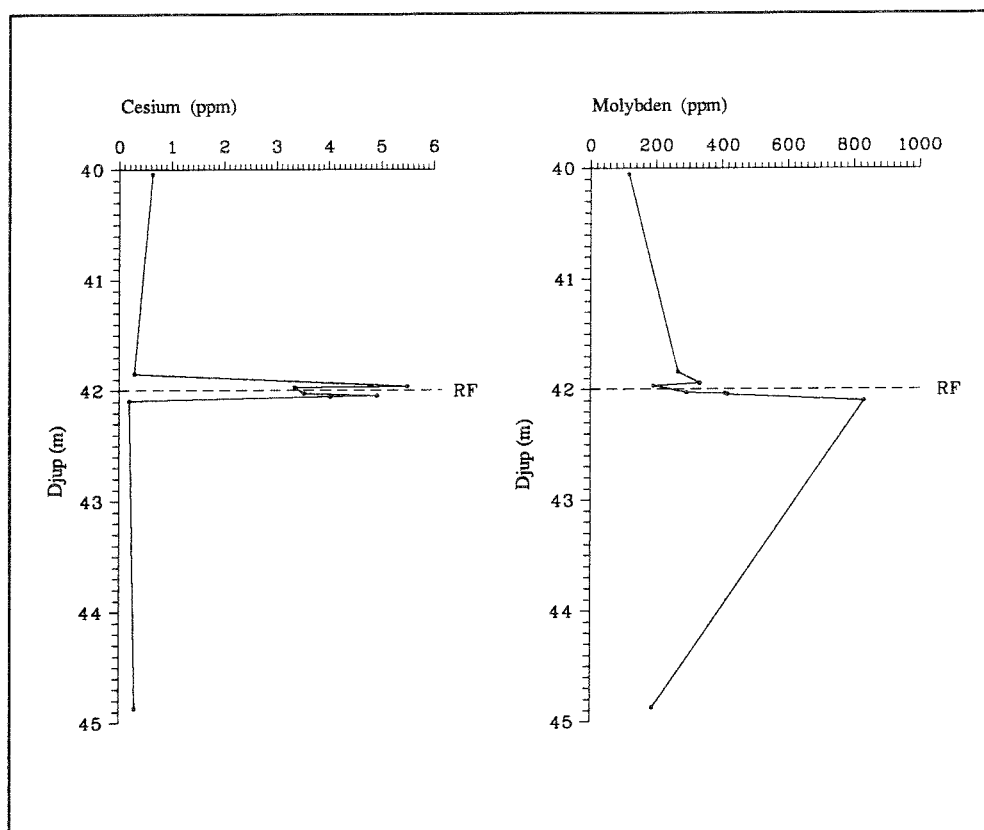
### 8.1.6 Plutonium

Plutonium är kanske inte något man förknippar med naturliga förekomster. Likväl finns det plutonium om än i mycket låga halter i uranmineral. Där bildas det kontinuerligt genom neutroninfångning i uran. Halten plutonium som uppmättes i en centimeterstor nodul av pechblände från Osamu Utsumi var  $2,3 \pm 0,7 \times 10^8$  atomer per gram. Halten plutonium som produceras i nodulen beror av bergets sammansättning inom en radie av 50 cm. Beräkningar visar att förhållandet Pu/U i pechbländenodulen är i sekulär jämvikt. Någon påtaglig fraktionering av plutonium från uran har således inte skett på åtminstone 100 000 år.

### 8.1.7 Kolloider

Förutsättningarna för kolloidbildning är mycket goda i såväl Morro do Ferro som Osamu Utsumi. Vittringen är intensiv och det vittrade berget är rikt på lermineral. Grundvattnet har ett lågt innehåll av lösta salter vilket ger hög stabilitet för t ex lerkolloider. Innehållet av järn och silika är relativt högt i grundvattnet. Redox- och pH-förändringar förekommer längs grundvattnets flödesvägar och kan ge upphov till lokala övermättnader av t ex uran. Grundvattenflödet är högt vilket också gynnar kolloidtransport.

Det finns rikligt med partikulärt material i det ytnära grundvattnet i Poços de Caldas, men koncentrationerna i det djupare grundvattnet är låga. I själva verket är halten kolloider i grundvattnet i t ex Morro do Ferro inte mycket annorlunda än vad som



**Figur 8-8.** Koncentrationsprofiler av cesium och molybden över en redoxfront, RF, i Osamu Utsumi.

förekommer i svenska grundvatten dvs mindre än 1 mg/l. Järnhydroxider och huminämnen dominerar medan lerpartiklar förekommer i tämligen låga halter. Med undantag för de organiska kolloiderna så liknar även sammansättningen den som man träffar på här.

Det är ingen tvekan om att polyvalenta metalljoner som torium och lantanider verkligen tas upp av grundvattnets kolloider. Noggranna analyser av lantanidernas inbördes koncentrationsförhållanden och uranisotoper visa emellertid att de här elementen inte har transporterats som partiklar från markytan utan snarast är i jämvikt med grundvattnet på det aktuella djupet. Sammanfattningsvis så kan man säga att visserligen är det klart visat att kolloider med torium, lantanider och uran bildas, men de transporteras inte i någon utsträckning av betydelse.

### 8.1.8 Hydrotermal transport

I uranmineraliseringen i Osamu Utsumi har en gång magma trängt in och orsakat en lokal upphettning, som i sin tur inducerat vattenflöde och hydrotermala förhållanden. Den här processen som varade i ca 20 000 år ledde till en omfördelning av uran i berget omkring intrusionen. Mineralen har analyserats och påverkan på berget har studerats i simulerande laborieförsök.

Konvektionsflödet av grundvatten och avsvälningen beräknades med en kopplad modell. Man fann att flödet varit koncentrerat till den permeabla breccian som intrusionen gett upphov till. Inte mindre än 100 ton hydrotermal lösning har passerat per  $\text{cm}^2$  i breccian.

Den hydrotermala cirkulationen har åstadkommit en uranhalt av 50 mg/kg i berget. Temperaturen har varit ca 300°C. Transporten av uran i berget kunde inte förklaras med litteraturdata på uranlöslighet. Uppenbarligen saknas bra värden. Olika bestämningar som är gjorda vid 330°C kan, fastän det är fråga om undersökningar på slutet av 80-talet, skilja på så mycket som 5 tiopotenser i löslighet! Påverkan av den hydrotermala cirkulationen på uranlösligheten fick istället uppskattas från observationerna i fält. Efter att ha kalibrerats mot observationerna i Poços de Caldas och mot laboratorieförsök så tillämpades den hydrotermala transportmodellen på ett hypotetiskt amerikanskt förvar. Maximumtemperaturen i det förvaret var 200°C. Beräkningarna visade att de hydrotermala förändringarna skulle bli endast 0,1% av det som observerats i urangruvan. Orsaken till den relativt obetydliga effekten i ett slutförvar beror framförallt på den mycket lägre hydrauliska konduktiviteten i det omgivande berget. Cirkulationen blir som följd härav mera diffus och inte så koncentrerad som i Poços de Caldas.

## 8.2 CIGAR LAKE-PROJEKTET

SKB deltar tillsammans med AECL och US DOE i ett projekt för att undersöka Cigar Lake-mineraliseringen som en naturlig analogi till ett djupförvar för utbränt bränsle. Projektet leds av AECL, under överinseende av CLMC. SKB gick med i projektet i april 1989 och avsikten var att delta i åtminstone tre år. Den fasen avslutas i april 1992. Hitills har två årsrapporter utkommit som sammanfattar resultaten under hand /8-30 och 8-31/.

Undersökningsprogrammet är uppdelat på följande delar:

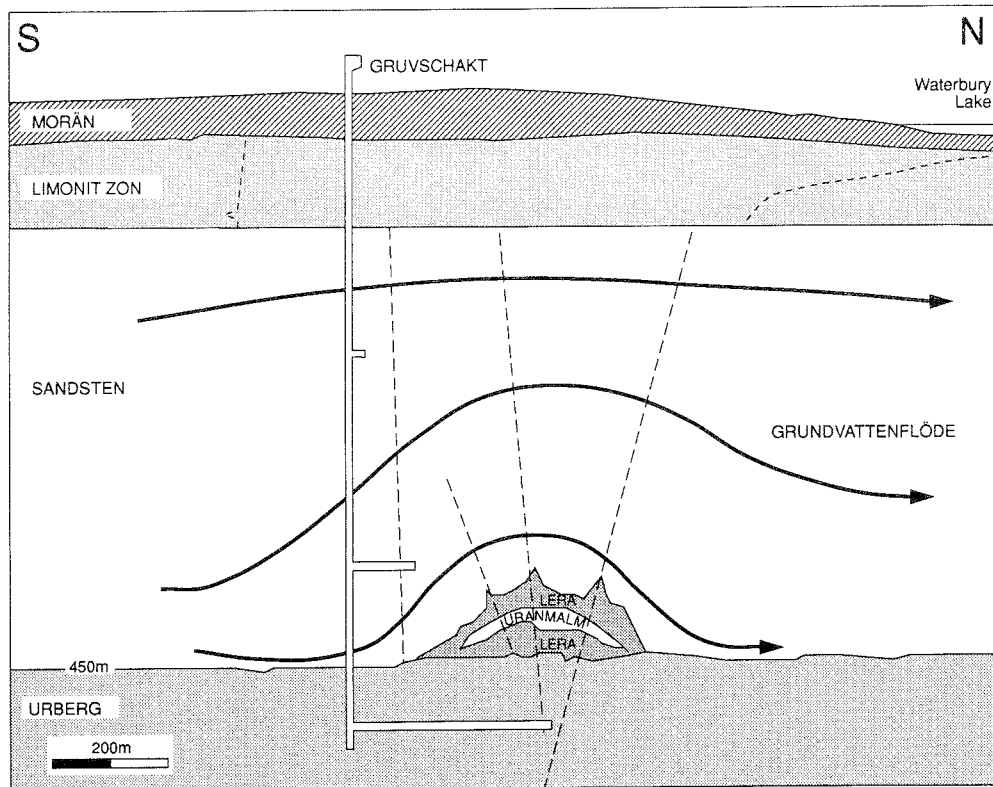
- Bergets mineralogi och kemi.
- Uranmalmen och produkter från kärnreaktionerna.
- Hydrogeologi.
- Hydrogeokemi.
- Kolloider.
- Organisk geokemi och mikrobiologi.
- Radiolys.
- Modellberäkningar.

Uranmalmen i Cigar Lake i norra Saskatchewan, Kanada, ligger på 430 m djup, se Figur 8-9. Malmkroppen är 2 km lång, 25 – 100 m bred och 1 – 20 m djup. Den är omgiven av ett 5 – 30 m tjockt lager av illitisk lera. Malmen ligger på en gammal sprickzon i det underliggande urberget. Berget ovanför består av sandsten som är hydrotermalt påverkad i området kring malmkroppen. Det är en ovanligt koncentrerad mineralisering. Medelhalten uran är 12% och koncentrationer över 55% förekommer.

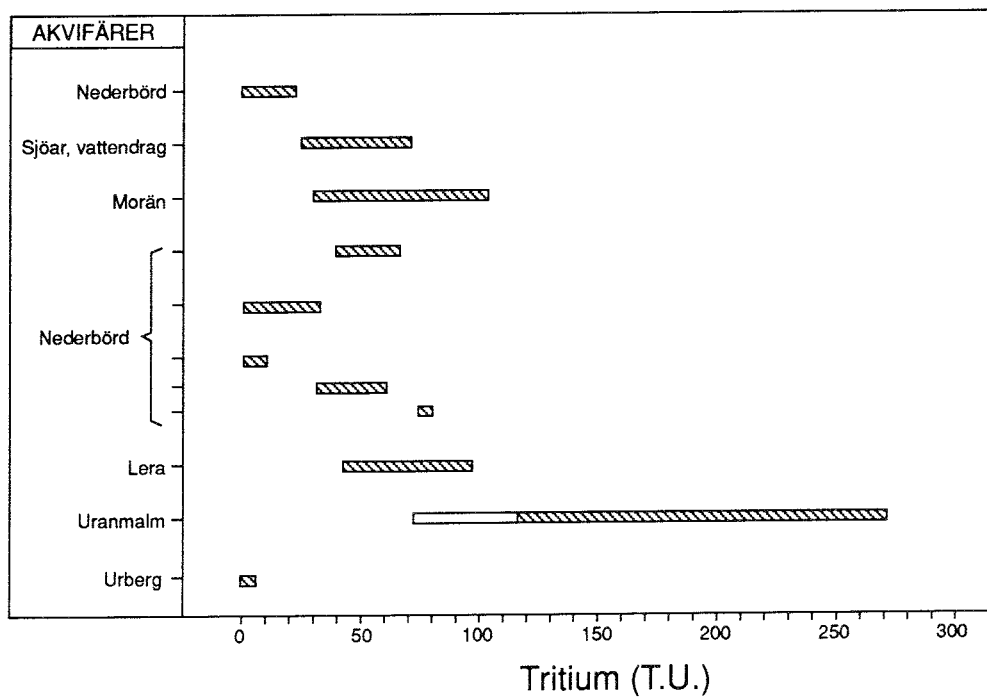
Uranmalmen och den omgivande leran bildades för 1,3 miljarder år sedan. Den har varit väl isolerad sedan dess. Det finns egentligen inget på markytan som avslöjar att det ligger en stor malmkropp under sandstenen.

Ett stort antal prospekteringshål har borrats. Cigar Lake Mining Company, CLMC, har också brutit ett schakt ned till malmen.

Cigar Lake har inte haft någon naturlig kriticitet liknande den som inträffade i Oklo i Afrika. De kärnreaktioner som nämns i den andra punkten i undersökningsprogrammet ovan avser produktionen av isotoper pga spontana neutroner från uran. På så sätt bildas  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{129}\text{I}$  and  $^{239}\text{Pu}$  i mätbara mängder. Så är exempelvis halterna av tritium ofta högre omkring malmen än vad man hittar i ytnera grundvatten, se Figur 8-10. Det tritium man hittar nära markytan kommer från kärnvapenprov i atmosfären. Det tritium man hittar nära malmen måste ha bildats där.



Figur 8-9. Profil tvärs över malmkroppen i Cigar Lake.



Figur 8-10. Tritium i grundvatten från Cigar Lake.



Radiolysundersökningarna är knutna till den redoxfront som observeras i leran runt malmen. Oxidationen av järnföreningar i leran kan vara orsakad av radiolys.

Modellberäkningarna omfattar såväl löslighet av radionuklider som transport. Följande typer av modeller prövas på mätresultat från undersökningarna i Cigar Lake:

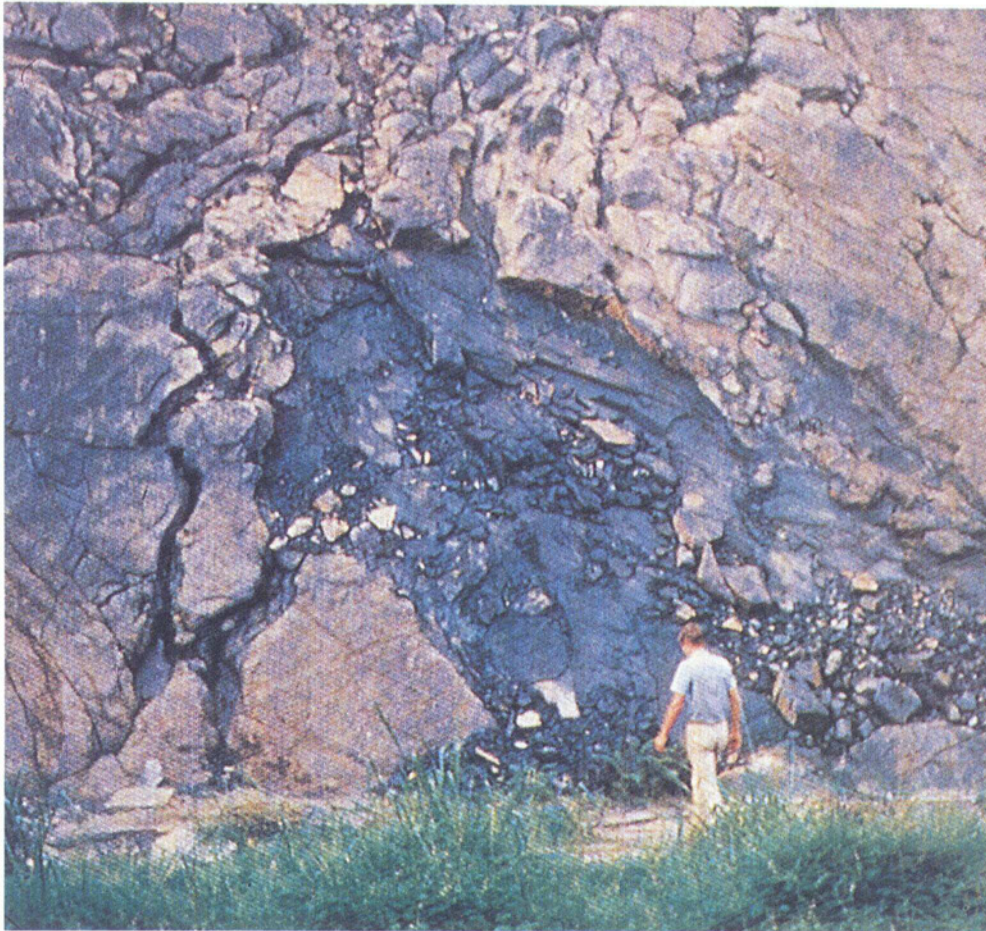
- Geokemiska modeller för löslighet och speciering av spårelement, radionuklider och produkter från kärnreaktionerna i uranmalmen.
- Modeller för radiolys och bränsleupplösning.
- Modeller för masstransport i närområdet och fjärrområdet.
- Modeller för påverkan av kolloider, naturliga organiska ämnen och mikrober på geokemi och radionuklidmigration.

Modellarbetet har intensifierats inför avslutningen av den pågående fasen i projekt-samarbetet.

### 8.3 OKLO-PROJEKTET

De naturliga reaktorerna i Oklo i Gabon, Afrika, undersöks som naturliga analogier till djupförvaring av högaktivt avfall. Projektet leds av CEA, Frankrike, med stöd av CEC. Projektet är öppet för internationell medverkan och utöver SKB deltar även organisationer och institutioner från Japan, USA och Canada.

Ett flertal reaktorzoner har hittats i uranmalmen i Oklo-gruvan, se Figur 8-11, och i det angränsande Okelobondo. Oklo har ett dagbrott. Brytningen fortsätter under jord



*Figur 8-11. En av reaktorzonerna i Oklo.*

i Okelobondo. En typisk reaktorzon är några meter i diameter och några decimeter tjock. Kriticiteten startade för två miljarder år sedan och varade ungefär hundra tusen år. Halten av uranisotopen  $^{235}\text{U}$  var då nästan 3,7%, dvs betydligt högre än idag /8-32/.

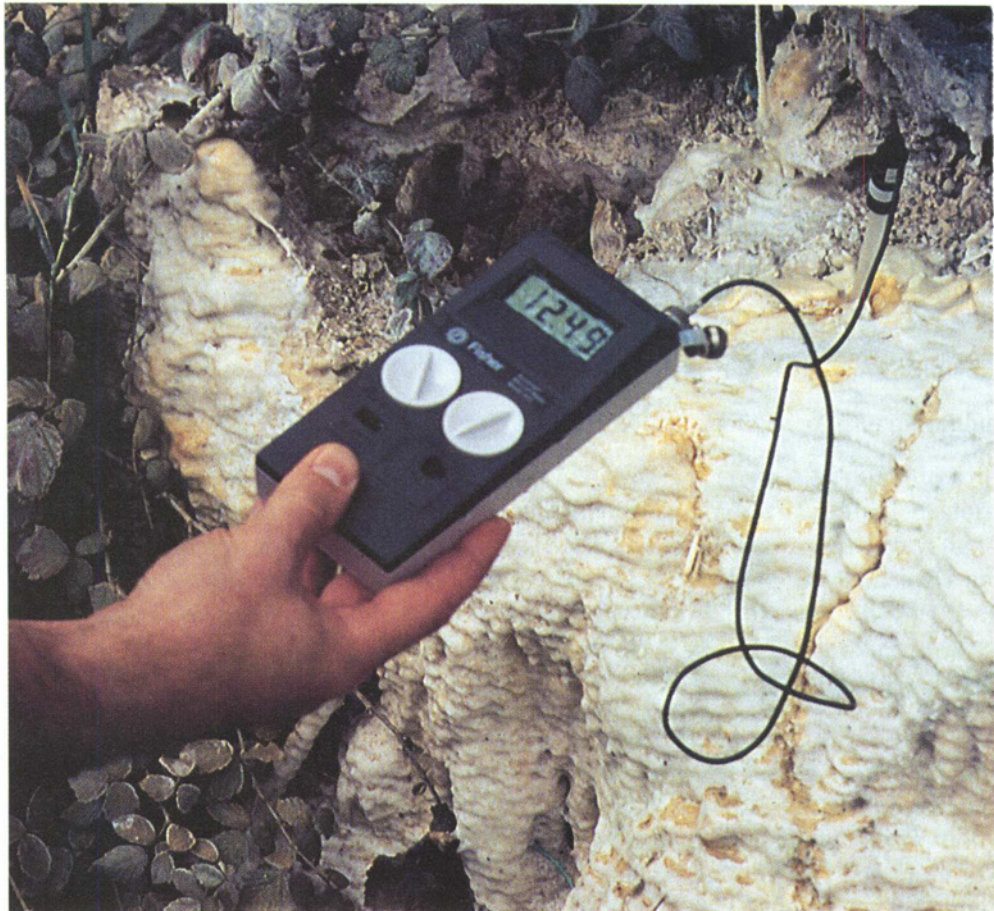
Under prospektering av nya uranfyndigheter upptäckte man en reaktorzon i Bagombe, som ligger ca två mil från Oklo. Den här reaktorzonen ligger nära markytan (10 – 30 m) och är ostörd eftersom den påträffats i borrhål. Någon brytning har ännu inte skett. SKB har deltagit i en rekognoseringsstudie av Bagombe-reaktorn under 1991. Man har nu beslutat att inkludera en undersökning av Bagombe i Oklo-projektet. Hittills har SKB även deltagit i provtagning och analys av vatten och mineral liksom hydrogeologiska undersökningar.

## 8.4 ÖVRIGT

Utöver de större projekt som redovisats ovan medverkar SKB även i ett antal mindre undersökningar. I Palmottu i Finland undersöks uranmalm i granit. SKB följer detta som observatör.

Aligator Rivers Analogue Projekt, ARAP, i Australien ingår som en studie i INTRAVAL-projektet. SKB följer detta genom vår medverkan i INTRAVAL.

I Maqarin i Jordanien förekommer hyperalkaliskt grundvatten (pH 12,5), se Figur 8-12, som i flera avseenden liknar betongporvatten. Portlandit,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , förekom-



*Figur 8-12. Mätning av pH i det hyperalkaliska grundvattnet i Maqarin.*

mer naturligt i Maqarin. Det har bildats genom förbränning av bitumen i den kalkhaltiga mörgelstenen. Självantändningarna orsakas av pyrit som oxideras i kontakt med luft. SKB undersöker tillsammans med NAGRA och NIREX det hyperalkaliska grundvattnet och mineralen i Maqarin som en analog till användningen av betong i ett slutförvar. Till det som utreds hör löslighet och speciering av radionuklider vid höga pH /8-33/ stabilitet av bitumen vid höga pH och bildning och stabilitet av mineralfaser i betong.

## 9 METODER OCH INSTRUMENT

### 9.1 MÅL FÖR VERKSAMHETEN

Med metoder och instrument avses i detta kapitel mätmetoder för insamling av geologiska, geohydrologiska, geofysiska, grundvattenkemiska och bergmekaniska data för karakterisering av en bergvolym samt mätinstrument som används för denna mätdatainsamling.

Huvudmålet för Metoder och Instrument är att tillse att lämpliga mätmetoder och utrustningar finns tillgängliga för att med höga krav på kvalitet och exakthet kunna insamla sådana data som erfordras för att karakterisera den eller de bergvolym(er) som kommer att undersökas inför anläggandet av SKBs djupförvar för långlivat radioaktivt avfall. Undersökningarna syftar till att beskriva bergets uppbyggnad och egenskaper, ta fram dataunderlag för analys av djupförvarets funktion och säkerhet samt för byggbarhetsanalys och projektering.

Ett delmål för Metoder och Instrument är att lämpliga metoder och utrustningar finns tillgängliga för SKBs geovetenskapliga forskning och för undersökningarna vid Äspölaboratoriet.

Ett annat delmål är att mätmetoder och instrument/utrustningar ska vara så väldokumenterade avseende teknisk utformning och handhavande att relevant bedömning av mätdatas kvalitet kan göras.

För att nå dessa mål kommer dels befintlig mätteknik att kritiskt granskas och vid behov förbättras eller kompletteras, dels kommer ny utveckling att genomföras. Medan stor del av metodutvecklingen sker inom ramen för annan geovetenskaplig verksamhet, t ex Äspölaboratoriet, bedrivs instrumentutvecklingen oftast genom särskilda utvecklingsprojekt.

### 9.2 NUVARANDE KUNSKAPSLÄGE

Kunskapen om bergets egenskaper på de djup som är aktuella för djupförvar av långlivat radioaktivt avfall, 500 m eller djupare, samt om undersökningsteknik för att bestämma dessa egenskaper är till stora delar resultatet av den omfattande geovetenskapliga forskningsverksamhet som bedrivits av SKB. SKB har alltsedan 1977 utvecklat fältundersökningsmetoder och utrustningar/instrument med avsikten att kunna genomföra fältmätningar på ett korrekt och rationellt sätt med hög kvalitet på data. En samlad och detaljerad redogörelse för dessa fältundersökningar gjordes i kapitlet om metod- och instrumentutveckling i SKBs FoU-Program 89 /9-1/.

I och med att den geovetenskapliga fältforskningen under de senare åren huvudsakligen varit koncentrerad till Äspölaboratoriet har också erfarenheter från ny eller modifierad undersökningsteknik huvudsakligen erhållits då sådan ny teknik provats eller används inom Äspölaboratoriet. En relativt detaljerad redogörelse för undersökningslogistiken samt alla de mätmetoder och mätinstrument som användes under förundersökningsfasen av Äspölaboratoriet har samlats i en projektrapport /9-2/.

Äspölaboratoriets andra och nu pågående huvudetapp, byggnadsetappen, omfattar dokumentationsarbeten och andra mätningar från tunneln samt långtidsobservationer

av grundvattensituationen, hydrauliskt och kemiskt, i syfte att validera de modeller och prediktioner som gjorts av Äspö bergvolym, baserat på förundersökningarna.

Resultatet från valideringen av gjorda prediktioner kommer att utgöra underlag för att ”verifiera förundersökningsmetoder, dvs demonstrera att undersökningar på markytan och i borrhål ger tillräckliga data om väsentliga säkerhetsrelaterade egenskaper hos berget på förvaringsnivå” (etappmål 1 för Äspölaboratoriet) /9-3/.

Verksamheten under Äspölaboratoriets byggnadsskede och därefter följande driftskede går också ut på att ”fastställa detaljundersökningsmetodik, dvs färdigutveckla och verifiera de metoder och den teknik som behövs vid karakterisering av berget i de detaljerade platsundersökningarna” (etappmål 2 för Äspölaboratoriet).

För dokumentation, mätningar och långtidsobservationer under byggnadsskedet har annan teknik än den som användes under förundersökningsskedet till stor del fått användas, dels beroende på att det är annan typ av mätdata som erfordras och dels beroende på att stora delar av datafångsten sker från tunnlar. Arbetet i tunnlar medför också speciella krav på samordning med tunneldrivningsarbetet. Denna typ av undersökningar under byggnadsskedet har snart pågått i 2 år, under vilken period såväl nya mätmetoder som mätinstrument utvecklats eller modifierats och erfarenheter inhämtats från användningen av dessa. Beroende på att valideringsarbetet utförs i etapper och någon sådan etapp hittills ej slutförts, med undantag för en begränsad övning avseende delar av tillfartstunneln, har hittills ej heller någon verifiering av förundersökningsmetoder kunnat göras.

Eftersom redogörelsen för kunskapsläget inom detta teknikområde var så utförlig i 1989 års forskningsprogram begränsas beskrivningen i detta avsnitt till vad som under de senaste åren kan anses ha varit kunskapshöjande, eller av annan anledning är värd att notera. Denna fortsatta beskrivning är huvudsakligen ämnesspecifikt disponerad.

### **9.2.1 Mätmetoder och instrument för undersökningar från markytan**

Under de tre senaste åren har markmätningar utförts i begränsad omfattning. Å andra sidan kan noteras att kunskapsläget anses gott avseende denna grupp av mätteknik, om man undantar reflektionsseismik.

Seismiska mätmetoders användning för karakterisering av kristallint berg är fortfarande begränsade, om man undantar refraktionsseismik som är vanligt förekommande för ytliga undersökningar. Orsaken torde vara att såväl mät- som tolkningstekniken är utvecklad för sedimentära bergformationer vars lagrade strukturer i allt väsentligt skiljer sig från det kristallina bergets sprickstrukturer.

SKB har vid ett par tillfällen provat reflektionsseismik för att från markmätningar kunna detektera horisontella eller subhorisontella sprickzoner, vilka är nästintill omöjliga att detektera med annan teknik. Härvid har såväl dynamit som vibrator använts som signalkälla, men hittills har inga tillfredsställande resultat erhållits. Behovet av förbättrad teknik kvarstår eftersom kännedom om horisontella zoner är mycket önskvärt redan innan ett resurskrävande borrhålsprogram påbörjas.

### **9.2.2 Mätmetoder och instrument för undersökningar i borrhål från markytan**

#### **Borrning**

Det är viktigt att borrning utförs på ett sådant sätt att det skapar de rätta förutsättningarna för att senare kunna genomföra borrhålsundersökningar av god kvalitet, samti-

diget som datainsamling redan under borrning ofta är av stort värde. Som beskrevs i det förra forskningsprogrammet genomför SKB numera vanligtvis kärnbörning med en sk teleskopbörningsteknik, innebärande att kontaminering av borrhax och spolvatten i bergsformationens sprickor och grundvatten reduceras avsevärt /9-2/.

En annan princip för uppföring av borrhax och borrhax från borrhaxen är att tillämpa omvänd spolning. Den kan utföras antingen med eller utan tillförsel av vatten från ytan, men i båda fallen transporteras blandningen av borrhax och vatten upp inuti borrhaxen, utan kontakt med borrhaxväggen. SKB har låtit utveckla tekniken i samband med kärnbörning utan tillförsel av vatten från ytan. Som spolvatten används endast formationsvatten, som pumpas upp genom borrhaxen med hjälp av mammutpumpningsmetoden. Borrtekniken, som hittills använts för 200 m borrhax, till djup av 300 m, har begränsningen att den är beroende av att vattenförande sprickor penetreras med ca 50–70 m mellanrum för att borrhaxkapaciteten ska vara jämförbar med konventionell kärnbörning /9-3/. I och med att inget spolvatten tillsätts och att inget borrhax kommer i kontakt med borrhaxväggen är metoden unik i det avseendet att den ger absolut minimal kontaminering. Detta kan vara av intresse i särskilda sammanhang då speciella krav på vattenprover ställs. En fördel i detta sammanhang är att metoden kan användas under begränsade borrhaxsnitt i samband med konventionell kärnbörning.

Vid borrhax genom större svaghetszoner är det ofta besvärligt att behålla borrhaxen stabila för de efterföljande mätningarna i borrhaxen. Så länge borrhaxmaskinen finns på plats kan hålet alltid rensas men därefter utgör instabilitet en stor risk för fastsättning av dyr mätutrustning eller att mätningar genom och under zonen inte kan genomföras. Stabiliserande injektering av zonen kan visserligen göras, men är oftast olämplig därför att man i och med detta omöjliggör hydrauliska tester och vattenprovtagning. Här vore teknik för icke störande stabilisering önskvärd.

### **Kartering av borrhaxkärna och borrhax**

Kartering av borrhaxkärna görs med sådan kvalitet som är önskvärd för SKBs vidkommande. Under senare tid har tolkningsarbetet kring kärnkarteringen utvecklats genom att integrera bearbetningen av borrhaxgeofysiska data i denna process.

Beträffande bestämning av sprickors orientering är det inte nödvändigt att orientera alla sprickor i en platsundersökning. Det är tillräckligt att sprickorna i ett par borrhax, strategiskt valda, ges absoluta orienteringar. Oftast görs detta genom att kombinera kärnkarteringen med observationer av borrhaxväggen. För detta ändamål är borrhax-TV och akustisk televiwer användbara metoder. SKB har på senare tid tagit fram en borrhax-TV som kan användas ner till 1000 m borrhaxdjup. Dock saknas ännu en effektiv bildprocessering för att spricktolkning med hjälp av borrhax-TV ska bli en standardmetod.

Exakt bestämning av borrhaxlets position längs hela dess längd, samt bestämning av olika mätningars exakta läge i borrhaxen, är nödvändigt dels för att kunna jämföra olika mätningar, dels för att samtolka data exempelvis genom multivariatanalys och dels för att kunna ge exakt underlag för detaljprojektering av eventuell undermarksanläggning. Inom detta område är förbättrad exakthet önskvärd.

### **Geofysiska mätningar i borrhax**

Vad gäller geofysisk borrhaxloggning finns sådana metoder tillgängliga som befunnits lämpliga för SKBs platsundersökningar /9-2/. Såväl instrument som processering och utvärderingsteknik har förbättrats, bl a genom att resultatplottar kan erhållas direkt efter mätningen.

Beträffande radartekniken som bergundersökningsmetod kan noteras att dess användbarhet avsevärt förbättrats genom framtagandet av riktantenner /9-5/. Riktning och avstånd till en detekterad struktur kan nu bestämmas från mätningar i endast ett borrhål. Särskilda antenner för mätningar från markytan eller i tunnlar har också tagits fram. Det speciella kravet för dessa antenner är att få en bra signalkoppling mot berget.

Radarns unika egenskap att "se" långt ut i berget är dock begränsad i berg med låg resistivitet, t ex där grundvattnet har hög salthalt. Men även under för radarn ogynnsamma förhållanden är metoden den enda som kan kartera bergets strukturer i borrhålens relativa närhet. Bl a ger kombinationen av flödesloggning och radarmätning med riktantenner en bra möjlighet att bestämma vattenförande sprickors tredimensionella utbredning.

För borrhålsseismik såsom Vertical Seismic Profiling (VSP) och mellanhålsseismik har användningen i kristallint berg kommit avsevärt längre, tack vare utvecklingen inom Stripaprojektet och arbeten inom det finska kärnavfallsprogrammet /9-6 respektive 9-7/. VSP mätningar har utförts vid ett tillfälle inom Äspöprojektet och metoden bedöms vara användbar för storskalig kartering av sprickzoner, bl a de tidigare nämnda horisontella zonerna, under den efterföljande borrhålsfasen av en platsundersökning. Fler erfarenheter torde dock behövas för att kunna verifiera metodens användbarhet.

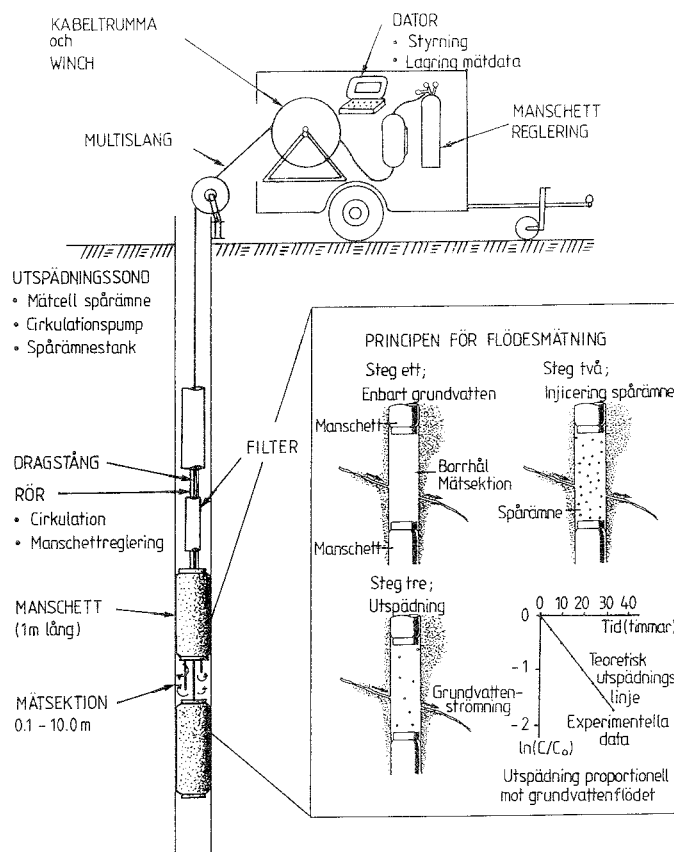
### **Geohydrologiska mätningar i borrhål**

Beträffande hydrauliska mätningar görs ett flertal sådana för att bestämma hydrologiska parametrar och kartlägga hydrauliska strukturers geometri, under olika skeden av ett undersökningsprogram och för karakterisering i olika skalor /9-8/. Använda metoder; tester under borrhålsborrning, test- och rensumpning, flödesloggning, injektionstester och transienta interferenstester, är väl beprövade och beskrevs i SKBs förra forskningsprogram samt mera ingående i Äspöprojektets metodrapport /9-1 respektive 9-2/.

Mätning av grundvattentryck eller grundvattennivåer görs oftast i flera, med manschetter åtskilda sektioner av ett borrhål, med syftet att mäta dels naturliga förhållanden och dels responser från pumpningar eller andra störningar. Grundvattentryckmätningar är ofta av karaktären långtidsregistreringar, vilket har inneburit att SKB utvecklat teknik som samtidigt möjliggör även andra borrhålsmätningar; vattenprovtagning, utspädningsmätningar och spårförsök /9-2, 9-9/. Utspädningsmätningar i denna typ av multimanschetterade borrhål har använts för att bestämma dels naturligt grundvattenflöde och dels eventuella förändringar av grundvattenflödet under pumpstester. Eventuella förändringar av grundvattnets salthalt kontrolleras dels med installerade konduktivitetssensorer och dels med hjälp av vattenprover.

För mätning av mycket låga grundvattenflöden krävs mätningar med en särskild utrustning, en sk utspädningssond med vilken den aktiva testvolymen bl a måste hållas begränsad, se Figur 9-1. En ny utspädningssond för 56 mm borrhål och minst 1000 m djup står just färdig efter genomförd vidareutveckling.

Storskaliga spårförsök har genomförts både inom Finnsjönprojektet och Äspöprojektet medan spårförsök i mindre skala utförts inom Stripaprojektet /9-10, 9-9, 9-11/. I Äspöprojektet användes bl a radioaktiva, kortlivade ämnen i ett radiellt konvergerande spårförsök med injektering från multimanschetterade borrhålssektioner och detektering av inflödesnivåer i pumphålet. Spårförsök med vattentrogna spårämnen ger information om flödesporositet, medan lämplig fältteknik för bestämning av den våta ytan (en väsentlig parameter för att beräkna sorptionen av radionuklider) ej finns framme. Spårförsök med sorberande ämnen är oftast alltför tidskrävande för att



**Figur 9-1.** Mätning av grundvattenflöde med utspädningsteknik; mätprincip och använd mätutrustning.

realistiska fältförsök ska kunna genomföras varför man för denna information huvudsakligen är hänvisad till laboratorieförsök.

Injektion av salt har använts i Stripa för att i kombination med radarmätningar bestämma transportvägar i bergvolymen /9-2/.

### Vattenkemiska mätningar i borrhål

Metoder att bestämma grundvattnets kemi framgår också av det förra forskningsprogrammet samt av Äspöprojektets metodrapport /9-1 respektive 9-2/. Utrustningen tillhörande SKBs mobila fältlaboratorium har på senare tid genomgått förbättring vad avser pump och kemisond. Vad gäller kemisonden har sondator och programvara bytts och en ny elektriskt driven pump innebär enklare teknik och större pumpkapacitet jämfört med den tidigare hydrauliskt drivna pumpen. För närvarande pågår framtagning av en ny multislang och ovanmarkdel till utrustningen.

### Bergspänningsmätningar

Som för tre år sedan finns två metoder för bergspänningsmätningar i djupa borrhål, överbörningsmetoden och hydraulisk spräckning. Medan den förstnämnda ger en absolut bestämning av spänningstillståndet i tre dimensioner, men är komplicerad att utföra, bygger den andra metoden på antagandet att den ena huvudspänningens riktning är parallell med borrhålet (vilket oftast är fallet i stabila urbergsområden med relativt flack topografi) samtidigt som dessa mätningar kan utföras på ett effektivare sätt. Lämpligen kompletterar metoderna varandra i ett undersökningsprogram, såsom var fallet i Äspöprojektets förundersökningsfas där några överbörningsmätningar



gjordes i ett borrhål (ner till 450 m) kompletterade med 38 bestämningar med metoden hydraulisk spräckning (ner till 970 m) /9-2/.

### 9.2.3 Mätmetoder och instrument för undersökningar från tunnlar och schakt

Sedan senhösten 1990 har undersökningar i tunnel utgjort huvuddelen av SKBs geodatainsamling, i och med undermarksbyggandet av Äspölaboratoriet /9-3/. Det huvudsakliga målet med den hittills pågående datainsamlingen är att ge underlag för validering av de prediktioner som, baserade på förundersökningarna, föregick projektets byggnadsetapp. Eftersom tunnelbygget är ett stort och resurskrävande arbete har det varit en huvudsträvan att alla basundersökningar skall genomföras enligt ett, gemensamt för bygge och undersökning upprättat, standardtidsschema för varje tunneldrivningscykel. Endast vid speciella undersökningar ska det vara nödvändigt att göra avbrott i tunneldrivningen. Hittills har mer än 1.5 km tunnel drivits och erfarenheterna av denna samverkan mellan bygge och undersökning är positiva.

I det följande beskrivs översiktligt den metodik som utprovats och används för dokumentationsarbeten och andra undersökningar från tunneln. Speciellt vad gäller undersökningar i borrhål från tunneln används i många fall samma teknik som vid undersökningar i borrhål från markytan, eller smärre modifieringar av sådan teknik.

#### Teknik för basdokumentation

Med basdokumentation menas här sådan kartering och mätning som görs av tunnelvägg eller i regelbundet återkommande sonderingsborrhål /9-13/. Tunnelkartering sker direkt efter det att varje sprängsalva lastats ut. Härvid karteras tunnelväggar, tunneltak och tunnelfront med avseende på bergarter, sprickor och strukturer samt vattenläckage. Karteringen sker manuellt på underlag utritat från ett 2-D CAD-system. Direkt efter karteringen digitaliseras karteringen och förs över på det nämnda CAD-systemet. Det finns visst behov av att effektivisera karteringen och digitaliseringen, något som för närvarande utreds vilka möjligheter som står till buds.

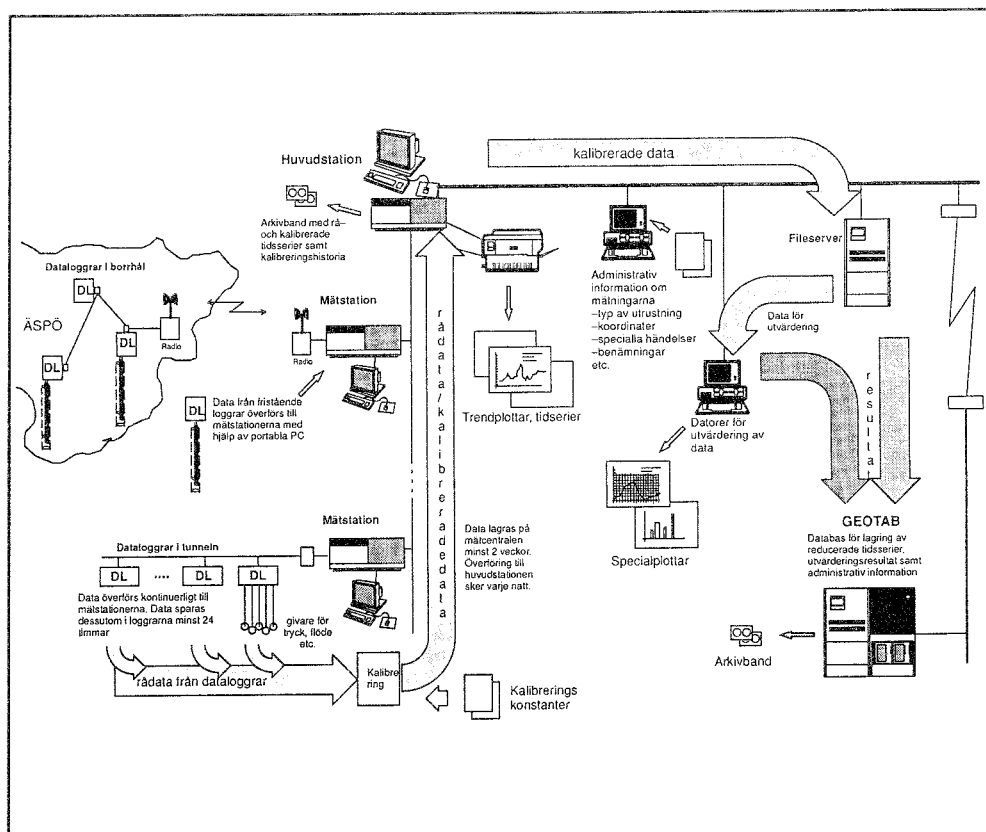
Sonderingsborrning utförs omkring var 20:de meter, med ca 20 m långa hål riktade något utåt och nedåt. Under denna sonderingsborrning görs manuell observation av borrsjunkning och färg på borrhax. Här kommer något slags system för registrering av borrhållens parametrar att på sikt tas fram.

I sonderingshålen utförs tryckuppbyggnadstester omfattande sektionen från 6 m till hålets botten. För detta ändamål har tagits fram mekaniskt opererade manschetter, vilka ska klara avtätning mot såväl stora vattenflöden som höga vattentryck. Till manschetterna ansluts tryckgivare och datalogger för dataregistrering. Data processeras sedan inom ramen för det hydrodatasystem, HMS, som tagits fram och beskrivs nedan. Tryckbilden i sonderingshålen registreras under den närmaste tiden, och några väljs ut för att ingå i observationsprogrammet.

Resultaten från basdokumentationen redovisas för varje 150 m tunnelavsnitt i form av överskådliga diagram utgörande underlag för validering av de gjorda prediktionerna /9-14/.

#### Observationsprogram

Prediktionerna omfattar även hur grundvattensituationen kring tunneln kommer att förändras, avseende tryck och kemi. Ett observationsprogram har därför upprättats och teknik tagits fram för att dessa observationer ska kunna hanteras på ett effektivt sätt. Således omfattas de tidigare nämnda multimanschetterade borrhålen från markytan i detta monitoringsprogram, vilket successivt utvidgas genom att strategiska borrhål i tunneln också inlemmas i programmet. Även vattenbalansen för tunneln



Figur 9-2. HMS-systemet för monitoring av grundvattentryck kring Äspölaboratoriet.

studeras genom att registrera vattenflöde i rörsystemen in respektive ut från tunneln, inläckage till tunnelavsnitt med hjälp av mätvallar och fukttransport in och ut via ventilationsluften. Mätvallarna är konstruerade för att ta hand om allt vatten som rinner i tunnelsulan; på och under vägbanan med speciell hänsyn till att få god tätning av det uppspruckna berget, samt i vägdiken. Vattnet leds till en mätdamm som är utrustad med s k Thompson-överfall, ett arrangemang som möjliggör såväl manuell avläsning som automatisk tryckgivareregistrering av vattennivån.

Monitoringssystemet, Hydro Monitoring System (HMS) bygger på ett datornätverk för platskontor och tunnel och med on-line radiokommunikation med de dataloggrar som registrerar grundvattentrycken i borrhålen från markytan, se Figur 9-2 /9-15/. Vidare är systemet uppkopplat mot SKBs datornätverk, vilket innebär att monitoring- en kan följas on-line inte bara från platskontoret utan också från SKBs huvudkontor och av de konsulter som anlitas för utvärdering och analys. HMS programvara är utvecklat för att på ett effektivt sätt registrera alla förändringar utan att systemet därför ska bli överfyllt av data. Rutiner för datasäkerhet, funktions- och kvalitetskontroll är inbyggt i system och observationsprogram. Sammantaget kan sägas att den använda tekniken för att göra långtidsobservationer fyller de behov som föreligger för denna typ av platsbeskrivning.

### Teknik för särskilda undersökningar från tunnel

För mätningar eller undersökningar som inte kan betraktas tillhöra vare sig basdokumentation eller observationsprogram används oftast samma mätmetoder som vid undersökningar från markytan eller varianter av dessa mätmetoder. Således utnyttjas radar och seismik på liknande sätt som beskrivits i tidigare avsnitt, med den skillna-

den att vid underjordsarbeten kan mätningar ibland utföras direkt från tunneln i stället för i särskilda borrhål. Metodernas tillämplighet för prediktioner av bergmassans kvalitet (framförallt ur byggarhetsaspekt) framför tunnelfronten har ännu inte klarlagts.

För uppföljning av observationer gjorda på tunnelväggen borrar ibland korta hål. Dessa kan inspekteras med borrhålsvideoskop, vilket visat sig vara förträffligt i vissa sammanhang, t ex vid uppföljning av injekteringsmedels spridning. Även punktflöden ur sprickor, s k channelling, har kunnat iakttas med detta instrument som har en räckvidd av ca 20 m borrhålslängd.

För hydrologiska undersökningar har tryckuppbyggnadstester i avmanschetterade sektioner av långa hål gjorts, såväl under borrning som därefter. Använd utrustning liknar den som används från mark, med den skillnaden att utrustningen måste klara avsevärt högre differensstryck. Det förhållandet att sprickzoner med stora vattenflöden (>1000 l/min) har penetrerats, under höga grundvattentryck (ca 2000 kPa) har inneburit att särskilda åtgärder måst vidtagas för att inte äventyra säkerheten i tunneln. Bl a förses borrhålspåhuggen med en form av ventilarrangemang om det förväntas att sådana vattenflödande zoner ska penetreras. Dessa tekniska arrangemang torde med endast smärre modifieringar vara tillämpliga ner till ca 500 m djup.

För att kunna genomföra mätningar i kraftigt vattenförande borrhål har ett annat slags tätningsarrangemang monterats vid borrhålsmyningen. Med detta arrangemang, som snarare stryker än stoppar vattenflödet, kan t ex flödesloggningar genomföras i borrhålen.

Vattenprovtagning är något enklare att genomföra från tunnlar, jämfört med från markytan, eftersom vatten vanligtvis flödar ur hålen. Registreringar av Eh och pH görs med samma flödesceller (CHEMMAC) som används i SKBs mobila fältlaboratorier. Sådana flödesceller placerade i Äspölaboratoriets tunnel kommer att anslutas till HMS, det ovan beskrivna monitoringsystemet. För att komma åt det mera hårt bundna vattnet eller vatten från mycket lågkonduktiva partier av berget måste särskild utrustning tas fram, ett arbete som har påbörjats.

Inom Äspölaboratoriets kommande experimentskede planeras olika slags försök. En grupp av experiment rör radionuklidens upplösning i grundvatten, sorption och diffusionsegenskaper på mineralytor i berget och i återfyllnadsmaterialet. Inom laboratoriet avses dessa experiment utföras in-situ, i borrhål, vilket anses nödvändigt för att kunna efterlikna naturliga förhållanden, bl a avseende grundvattnets sammansättning och bibehållande av reducerande förhållanden. För detta ändamål har utvecklingen av en särskild borrhålssond, CHEMLAB, påbörjats, se vidare avsnitt 9.3.2.

### 9.3 PROGRAM 1993–1998

Som framgår av avsnittet nuvarande kunskapsläge har SKBs långvariga och djupgående arbeten med fältundersökningar, som vid behov också inneburit utveckling av nya instrument och mätmetoder, medfört att lämplig undersökningsteknik för förundersökningar finns tillgänglig, med undantag av endast på några få områden där kompletteringar behöver göras. Äspölaboratoriets byggnadsskede kommer att ge underlag för validering av de prediktioner som gjordes på basis av förundersökningar, och härigenom kommer den använda förundersökningsmetodikerna att kunna verifieras.

Beträffande undersökningar under jord, vilka oftast innebär mera detaljerade undersökningar, har också stora erfarenheter samlats från SFR, Stripa och Äspö, men här

kommer även de kommande årens verksamhet inom Äspölaboratoriet att tillföra ett avsevärt kunnande.

Den verksamhet som planeras inom området metoder och instrument för åren 1993-1998 har huvudsakligen anknytning till platsundersökningar för Djupförvaret och till Äspölaboratoriet. Den speglar de "luckor" eller begränsningar i teknikkunnande som noterades i tidigare genomgång, och presenteras nedan i samma ordning som den tidigare genomgången.

### **9.3.1 Mätmetoder och instrument för undersökningar från markytan och i borrhål från markytan**

#### **Borrning**

Som noterades i avsnitt 9.2.1 är det ofta svårt att insamla data från krosszoner. Ibland (om än sällan) kan problemet ha sådan magnitud att borrarngen inte kan fortsätta, men oftast består problemen i att man inte kan föra ned mätutrustningar genom zonen, antingen pga blockering eller också beroende på alltför stora risker för fastsättning. För att komma tillrätta med detta problem kommer stabilitetsförbättrande teknik att studeras, och eventuellt provas. Målsättningen är att stabilisera borrhålet utan att för den skull göra borrhållsväggarna täta, eller helst ej ens påverka borrhålets hydrauliska egenskaper.

SKB kommer med start under hösten 1992 att borra ett ca 1500 m djupt hål för att studera grundvattenkemi och grundvattenomsättning på detta djup. För att lyckas med detta kommer förmodligen större bormaskiner än de som vanligen används att behövas. Det är viktigt att denna borrarngen planeras rigoröst, något som eventuellt kan innebära att borrarntechniken till viss del behöver modifieras eller kompletteras. Även för de efterföljande mätningar i detta hål förutses att vissa kompletteringar måste göras, bl a för att kunna klara de högre vattentrycken.

#### **Kartering av borrhåll och borrhål**

För att få en geometriskt riktig bild av borrhål och mätpunkters läge i borrhål är det för närvarande viss brist i längdangivelserna. Speciellt vid jämförelse mellan olika mätningar eller för multivariatanalyser är det väsentligt att mätdata som bearbetas avser samma mätpunkt. Även vid god noggrannhet på längdmätningen hos varje mätmetod kan felet bli utslagsgivande. SKB har under en tid undersökt olika vägar att komma tillrätta med denna brist, ett arbete som kommer att fortsätta. Teknik för att aptera märken i borrhållsväggen och sedan med varje mätutrustning detektera dessa märken för längdkalibrering är en väg som provas.

Den borrhåll-TV som utvecklats av SKB för 1000 m djup avses vidareutvecklas genom att tillföra förbättrad bildprocessering, så att sprickors orientering enklare ska kunna bestämmas. För detta ändamål ska också en ny riktningsmätare för kamerasonden byggas in (av samma prestanda som de mätare som används för att bestämma borrhållens orientering). I och med detta ska TV-filmning och borrhållsorientering kunna utföras vid en och samma borrhållsmätning.

#### **Seismik och radar**

Seismik och radar är som tidigare nämnts att betrakta som de enda metoder som finns för att på distans, från markyta eller från borrhål, kunna detektera och lokalisera sprickzoner eller andra väsentliga strukturer. Metoderna har något olika användbarhet med avseende på bergförhållanden. Således har radarn en begränsad räckvidd i lågresistiv miljö, såsom vid salt grundvatten, medan dess förmåga att mera i detalj ange strukturers riktningar är större än seismikens.

Horisontella eller subhorisontella sprickzoner har stor betydelse för grundvattenomsättningen kring ett djupförvar /9-16/. Därför är det väsentligt att kunna detektera och lokalisera sådana zoner på ett riktigt sätt, speciellt fördelaktigt är att en sådan detektering kommer till stånd tidigt under förundersökningarna. De seismiska metoderna reflektionsseismik och VSP, från markyta respektive från borrhål, är härvidlag potentiella metoder som provats och kommer att utprovas vidare. För grundare djup i berget är även markradar en metod som är potentiellt användbar för detta syfte.

#### **Geohydrologiska mätningar**

Vad gäller de hydrauliska testutrustningarna multivagnssystem och rörgångsutrustning kommer hög tillgänglighet att vidmakthållas genom att byta ut gamla datorsystem mot nya, moderna mätdatorer och programvaror.

#### **Vattenkemiska mätningar i borrhål**

Som nämndes i avsnitt 9.2.1 har SKBs mobila fältlaboratorium försetts med ny pump och ny kemisond. För närvarande pågår framtagningen av ny multislång och ovanmarksdel till samma utrustning vilket sammantaget gör utrustningen mera flexibel och lätthanterlig.

### **9.3.2 Mätmetoder och instrument för undersökningar från tunnlår och schakt**

#### **Sammanställning av mätmetodik**

Liksom gjordes för mätmetodik och instrument som användes under Äspölaboratoriets förundersökningar kommer en rapport rörande metodik och instrument för mätningar och dokumentationsarbeten använda under jord att sammanställas under 1993.

#### **Teknik för basdokumentation**

Underhand som basdokumentationen av Äspötunneln fortgår parallellt med drivningen av tunneln kommer använd teknik för denna dokumentation att successivt ytterligare trimmas och vid behov förbättras. Bl a förutses effektivisering av momenten tunnelkartering och digitalisering av karteringsinformation till CAD-systemet. Möjligheten att utnyttja ritdatorer vid karteringen och/eller använda totalstation (för direkt inmätning av sprickor etc.) eller streckkodssystem utreds.

För sonderingsborrning kommer system för registrering av borrhållska parametrar att tas fram. Rätt utnyttjad kan sådan information utnyttjas för detektering av zoner och vattenförande sprickor. Även vid kärnborrning kan sådana parametrar ge kompletterande information. SKB följer även andra utredningar och tester inom detta område, bl a de som görs i BeFo's regi.

#### **Observationssystem**

Långtidsobservationer av grundvattnet är en väsentlig verksamhet för såväl platskarakterisering som registrering av långtidsförändringar, både under naturliga som störda förhållanden. Inom Äspölaboratoriets ram har teknik utvecklats och provats som är både flexibel och användbar för olika typer av mätningar, se avsnitt 9.2.2. Tekniken har successivt byggts på för att passa Äspölaboratoriets olika skeden, så att ett obrutet observationsprogram har kunnat vidmakthållas, förutom under perioder då andra aktiviteter har utförts i borrhålen. Systemet byggs ut i takt med att nya mätpunkter inlemmas i observationsprogrammet och modifieras eller revideras vid behov.

### **Teknik för särskilda undersökningar i tunnel**

Under Äspölaboratoriets fortsättning, tunneldrivning från 330 m nivån, kommer vissa studier att fokuseras på att i detalj beskriva berget och att prognosticera och lokalisera lämpliga volymer för olika försök eller med olika egenskaper. Härvid förutses att man studerar hur radar och seismik, som distanskaraktäriserande metoder, bäst kan användas. Bl a hur dessa metoder kan utnyttjas för att prognosticera bergets karaktär framför tunnelfronten, något som inte minst ur byggbarhetssynpunkt är viktigt.

Det tätnings- eller snarare stryppningsarrangemang som utnyttjats vid loggning i starkt vattenförande borrhål under jord och vid höga tryck bör förbättras för att även klara förhållanden vid 500 m djup.

### **Kemiutrustning**

Det vatten som är starkt bundet i bergets små porer är mycket svårörligt och bedöms som mer eller mindre stagnant. Provtagning är därför komplicerad och tidsödande, men anses mycket betydelsefull för att bidra till att få en komplett bild av grundvattnets kemi, och kommer därför att utföras inom Äspölaboratoriet. Här ställs höga krav på bl a materialegenskaper för att vattenproverna inte ska bli kontaminerade. För detta ändamål håller en utrustning på att tas fram, innehållande manschettsystem, och en särskilt variant av flödescell för registrering av Eh och pH.

### **CHEMLAB-sond**

Som noterades i avsnitt 9.2.3, planeras en grupp av experiment som avser att studera radionuklidens upplösning i grundvatten, sorption och diffusionsegenskaper på minerallytor, i berget och i återfyllnadsmaterialet. För att kunna efterlikna naturliga förhållanden, bl a avseende grundvattnets sammansättning och reducerande förhållanden kommer dessa experiment att utföras in-situ, i Äspölaboratoriet.

Planeringen av dessa experiment innebär bl a att en särskild borrhålls-sond, CHEMLAB, håller på att utvecklas. Den konstrueras för att användas i 50–100 m långa hål, borrade från lämpliga delar av laboratoriet. CHEMLAB-sonden kommer att bli en komplex utrustning bestående av flera sammankopplade sonder, där bl a migrationsförsök kommer att utföras på riktiga bergprover och med omgivande grundvatten. En väsentlig del i utvecklingen av denna sond är att välja lämpliga material för att undvika sorption i själva utrustningen. Härvid kommer bl a den särskilt beständiga plastprodukten PEEK att användas i ventiler, kromatografipumpar, rör, etc.. Sonden ska i övrigt innehålla bl a lösningstankar, kolonner och fraktionssamlare. Eftersom även radioaktiva isotoper avses användas i vissa experiment utformas sonden så att hanteringen ur radiologisk synpunkt inte ska vålla några problem.

För utvecklingen av CHEMLAB-sonden har CEA, Frankrike, kontrakterats. CEA har omfattande erfarenheter av likartade borrhålls-utrustningar, bl a FORALAB. För experimenten i Äspölaboratoriet kommer SKBs CHEMMAC-sond att integreras med CHEMLAB för mätning av Eh och pH.

### **Andra experiment**

Även för andra experiment i Äspöprojektets nästa skede, driftskedet, förutses behov av särskild mätteknik och utrustningar. Behoven kommer att klarläggas vid planeringen av dessa experiment och kan därför inte specificeras här /9-3/.

## 10 BIOSFÄRSSTUDIER

### 10.1 ALLMÄNT

Biosfärsstudierna omfattar händelsekedjan från radionuklidens transport i grundvattnet ur berg till påverkan på människa eller annan organism. Målet med dessa studier är att kunna beskriva konsekvenserna av ett eventuellt utsläpp av radioaktiva nuklider från ett slutförvar.

Slutförvaringen syftar till att isolera det radioaktiva avfallet från biosfären under så lång tid att radioaktiviteten avklingar till en ofarlig nivå. Om de isolerande barriärernas funktion av en eller annan anledning sätts ur funktion kan dock radioaktiva ämnen nå biosfären tidigare. För att kunna bedöma konsekvenserna av sådana onormala förlopp behöver man kunskap om hur radioaktiva ämnen sprids i biosfären, i vilken omfattning de tas upp i människokroppen, vilken stråldos de ger upphov till och slutligen vad denna dos har för effekt. Tiden från deponering till genombrott till närzonen uppskattas i normalfallet med intakta tekniska barriärer vara i storleksordningen miljontals år. I de fall då de tekniska barriärerna av någon anledning är ur funktion kan genombrottstiden vara i storleksordningen tusentals år (hundratals i de mest pessimistiska scenarierna). Till detta kommer fördröjningen i när- och fjärrzon, varför endast de radionuklider som har mycket lång halveringstid kommer i fråga för biosfärsanalyserna.

Till biosfären räknas normalt den del av vår värld dit människan har tillträde. Denna avgränsning skall dock inte tas alltför bokstavigt t ex då dos till andra organismer studeras. I denna ingår följande processer och beräkningssteg signifikanta för säkerhetsanalysen.

- Transport från grundvattnet i berg till ett lokalt ekologiskt system via olika lokala mottagare såsom sediment, jord, vatten m m.
- Transport, utspädning, ackumulering och deponering i lokala, regionala och globala ekologiska system.
- Transport till människor genom t ex produktion och distribution av livsmedel, och
- Upptag i människokroppen beroende på kostvanor och upptagsfraktioner.
- Beräkning av individdoser och kollektivdoser samt jämförelse med naturliga förhållanden.

### 10.2 MÅL

Det övergripande målet för SKBs studier av radioaktiva ämnens uppträdande i biosfären är att kunna genomföra säkerhetsanalysens konsekvensberäkningar på ett trovärdigt sätt. Insatserna koncentreras på att kunna göra en uppskattning av vilka konsekvenser olika utsläppsscenarier från SFL har i ett tidsperspektiv i storleksordningen 10 000 år. Delmål i denna process är:

- Söka kvantifiera de osäkerheter som beror på att biosfären hela tiden förändras.
- Förbättra det dataunderlag som spridningsmodellerna vilar på.
- Validera modellerna genom studier av analoga spridningsprocesser.

Under kommande 6-årsperiod kommer studierna i hög grad att fokuseras på de lokala förhållandena på kandidatplatserna.

## 10.3 NUVARANDE KUNSKAPSLÄGE

### 10.3.1 Transport från grundvatten i berg till ett lokalt ekologiskt system via olika lokala mottagare såsom sediment, jord, vatten m m

Transporten mellan grundvatten i berg och de mera heterogena och biologiskt aktiva medierna i biosfären är mycket mindre undersökt än motsvarande transport i när och fjärrzon. Små skillnader i förutsättningar kan medföra utsläpp i helt olika recipienter. En rad olika fysikaliska och kemiska processer är av betydelse för transporten

- vattenomsättning,
- diffusion,
- sorbtion/desorbtion,
- advektion (gastransport),
- resuspension,
- bioturbation (stora och små djur),
- vittring (redoxzon försurning),
- utfällning (redoxzon),
- jonbyte.

En rad av dessa processer är beroende av platsspecifika förhållanden som

- kemisk och fysikalisk grundvattensammansättning,
- redoxförhållanden,
- markens och sedimentens egenskaper i utströmningsområden,
- hydrauliska förhållanden.

Osäkerheten blir därför ofrånkomligt hög vid försök att modellera denna transport, speciellt om platsens egenskaper inte är tillgängliga.

#### **Brunnar**

Bergborrade brunnar är en kritisk transportväg från djupt grundvatten direkt till miljöer i människans närhet. En brunn betraktas ibland som ett fall av intrång ("intrusion") men eftersom brunnar är så vanligt förekommande kan de också betraktas som resultat av normalt mänskligt beteende. Vissa studier av brunnars egenskaper har gjorts /10-1/ men svårigheter kvarstår att modellera deras betydelse eftersom faktorer som utspädning, kapacitet, användningsmönster och livslängd varierar inom så vida gränser.

#### **Transport genom sediment och jord**

Grundvattnet och medföljande radionuklider 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 och även förändring av kemisk form. 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 hanterats som en fördelningstransport, styrd av vattenflöden och  $k_d$ -värden och approximerats med ett antal överföringskoefficienter, baserade på  $k_d$ -värden. Dessa  $k_d$ -värden har stora variationer beroende på typ av jord/sediment. Dessutom har dessa parametrar stor betydelse för utfallet av modelleringarna. En del studier /10-2, 3/ visar dock att vidare studier av detta gränsskikt är befogade.

En detaljundersökning av utströmning i sjöar "Nuklidtransport i utströmningsområden" initierades under 1987. I denna gjordes bl a provtagning i Hillesjön och Långhalsen i Södermanland för att undersöka hur bottensedimentens kemi och fauna i utströmningsområden skiljer sig från bottensedimenten i övrigt. Projektet avslutades



under 1991 /10-4/ med huvudsaklig slutsats att de modelleringar som gjorts av utströmningsområden varit korrekta in den relativt grova detaljeringsnivå som använts.

### 10.3.2 Transport, utspädning, ackumulering och deponering i lokala, regionala och globala ekologiska system

Tidigare beräkningar har genomförts med tillgängliga data om dagens ekologiska system. Liknande modeller har använts för prediktering och uppföljning av nedfallet från Tjernobylolyckan där det visade sig att vår kunskap om anrikning och transport var oväntat dålig. Möjligheten att prognosticera tusentals år framåt i tiden är naturligtvis små, även om felmarginaler på en faktor 100 accepteras /10-5/. Att kvalitativt validera använda modeller är för dessa tidsperspektiv omöjligt, eftersom scenariot förändras i tiden på ett okänt sätt.

#### Potentiella koncentrationseffekter

Normalt medför transport i ekosystemen en stor utspädning av nuklider. Viss anrikning förekommer men i de flesta fall är cykeltiden kort, dvs anrikningen upphör efter något år och är inte betydelsefull om en tioårsperiod studeras. Anrikning i biota (räka-abbore-gädda) beaktas i de överföringsfaktorer som används. Ett fåtal, ganska speciella fall, kan innebära att radionuklider koncentreras under en längre period (tusen år), för att sedan kunna frisläppas under en kortare period (tio år) och ge upphov till relativt höga koncentrationer. Ett sådant naturligt förekommande exempel är ackumulering av transuraner i botten på torvmossar /10-6/, som kan innebära höga koncentrationer uppnås då torven bryts. Förbränning kan också skapa höga koncentrationer i träaska /10-7/ och i aska från torvbränning /10-8/.

#### Biosfärens evolution

Eventuella aktivitetsutsläpp från ett slutförvar kommer i normalfallet att ske så långt fram i tiden och under så lång tidsrymd att betydande förändringar i biosfärens egenskaper förväntas inträffa före eller under utsläppsförloppet. Detta innebär att analyser av konsekvenserna av ett utsläpp kommer att ha stora osäkerheter.

Den största osäkerhetsfaktorn i biosfären hänger ihop med ekosystemens naturliga evolution under de tidsperioder som kan anses realistiska /10-9/. 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.

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. Geologiska studier utförs emellertid och kan ge en kvalitativ bild.

Människans 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 /10-10/. 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 /10-11/. En inventering av rimliga sådana företeelser har diskuterats i samband med SKB/SKIs gemensamma scenariodefinitionsarbete /10-12/.

SKB har studerat processen där sjöars bottensediment gradvis omvandlas till åkerjord. En insamling och bearbetning av data för Trobbofjärden i Södermanland har gjorts /10-13, 14, 15/ omfattande vattenflöde sedimentationshastighet, porvattenegenskaper, vattenkvalitet under olika skeden m m. Modellering och variationsanalys /10-16, 17/ 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.

### **10.3.3 Studier av Tjernobylnedfall**

Med anledning av Tjernobylyolyckan initierades 1986 en studie av nedfallet i SKBs undersökningsområden, Gideå och Finnsjön /10-18, 19, 20/. Sedan slutet av 1991 har alla fältinsatser avslutats och verksamheten inriktas på sammanfattning och utvärdering. 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. Målet för provtagnings och mätprogrammet är att kunna utnyttja migrationen av nukliderna i nedfallet för verifiering och validering av modeller som beskriver 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 förfinas och dra nytta av de platsspecifika data som finns /10-21, 22/. Modelleringen syftar till att beskriva migrationen av de olika nukliderna i ytliga delar av geosfären inkluderande grundvatten, berg, jord och biomassa. Mätningar av nuklidkoncentration i artesiska borrhål har bl.a. visat att vissa nuklider transporteras ned till 100 m djup på 200–400 dagar /10-23, 24/, vilket både stöds /10-25/ och motsägs /10-26/ av tidigare undersökningar. Under 1992 har de första sammanställningarna publicerats /10-27/ avseende kemisk speciering /10-28, 29/ och aktivitetskartering /10-30/.

Bindning av aktinider på organiskt material i jordar kan vara en väsentlig faktor för expositionsvägen via grönsaker, kött och mjölk. Komplexbindning av bl a jod kan ha stor betydelse. Betydelsen av osäkerheten i transuranernas omsättning kommer att utvärderas. Eventuellt kan experimentella studier behöva genomföras.

### **10.3.4 Transport till människor genom produktion och distribution av livsmedel**

Dagens produktionssystem för livsmedel är så komplicerat att även om man känner halterna av radionuklider i de ingående råvarorna kan man inte beräkna intag till en viss individ (med kända kostvanor) tillräckligt noggrant /10-31, 32/. I säkerhetsanalysen förbises ofta den stora (några tiopotenser) utspädningsfaktor som produktion och distribution framkallar. Där har, i stället, en helt självförsörjande gård använts för att kunna beskriva ett ”ogynnsamt men inte helt omöjligt eller otroligt fall” /10-33/.

Produktionsmetoderna för livsmedel är en av de faktorer som påverkar hur olika delar av ekosystemen kommer att knytas till människans inre miljö. Ett exempel från dagens situation är bevattning av åkermark /10-34/ vars omfattning måste förändras inom några hundra år, beroende på ackumulering av salter m m i jordarna.

### **10.3.5 Upptag i människokroppen beroende på kostvanor och upptagsfraktioner**

Kostvanor varierar mellan olika orter och människor, Denna variation är relativt väl känd och hanteras i modelleringen /10-33, 35, 36/. Emellertid kan kostvanor och andra levnadsvanor komma att ändras mera radikalt i framtiden. Detta innebär en, med tiden, ökad osäkerhet som är svår att kvantifiera.

Upptagsfraktioner är också relativt väl kända genom arbeten inom andra ämnesområden (nuklearmedicinska) och internationellt samarbete /10-37, 38/.

### **10.3.6 Beräkning av individdoser och kollektivdoser samt jämförelse med naturliga förhållanden**

Konsekvens eller påverkan beror av skador och sannolikheten för dessa skador, något som ibland sammanfattas som risk. En bedömning av riskbilden för ett slutförvar för högaktivt avfall, kan eventuellt jämföras med riskbilder för andra företeelser i samhället. En sådan jämförelse skulle kunna fördela de resurser som används för riskbegränsning på ett annat (bättre) sätt. SKB har dock inga planer på att göra en sådan jämförelse, utan bedömer konsekvens utefter de acceptanskriterier som SSI och SKI kommer att fastställa.

Individdosen är ett av de acceptanskriterier som kan förväntas gälla för ett slutförvar. Som beskrivits ovan, är det svårt att få en bra bild av hur fördelningen av individdoser ser ut, utan vi får nöja oss med en konservativ bild av det ogynnsamma ej otroliga fallet. Översättningen från individdos till risk, blir i de aktuella dosintervallen en översättning till stokastisk skada (vanligen cancer), och kommer alltid att vara svår att kvantifiera, speciellt för aktinider /10-39/.

Kollektivdos är lättare att beskriva i siffror, men tolkningen av dessa är mycket omdiskuterad. Det hävdas t ex att ett tröskelvärde trots allt existerar någonstans vilket har stor betydelse för konsekvenserna eftersom det är så otroligt små doser som adderas under så många år.

En alternativ syn på förvarets konsekvenser är att jämföra med de naturliga radioaktiva nuklider som förekommer i vår natur. Vissa sådana områden med mycket höga halter är undersökta /10-6/ men det saknas ofta en fullständig analys av vilka konsekvenser de förhöjda halterna har haft.

### **10.3.7 Platsspecifik studie av Äspöområdet**

För närvarande pågår en platsspecifik studie i området för Äspölaboratoriet. Området kommer att karakteriseras med avseende på förekomst av naturlig radioaktivitet i ytliga vatten, grundvattenförhållanden, utströmningsområden, jordarter, markanvändning, biota, befolkning m m /10-40/. Karakteriseringen bedöms vara avslutad under 1993 varefter området kan användas för metodstudier.

### **10.3.8 Matematisk och konceptuell modellering av spridning i biosfären**

Spridning i biosfären beror av ett stort antal processer och föränderliga basdata. Modelleringen behandlas därför med mycket generella sk kompartmentmodeller, kopplade till multiplikativa modeller för upptag i biota och dosberäkning /10-36/.

SKB har nästan uteslutande använt programkoden BIOPATH i kombination med programsystemet PRISM för osäkerhetsanalys. Dessa koder har jämförts med andra i

de internationella studierna BIOMOV5 /10-41/, VAMP /10-42/ och PSAC /10-43/ och befunnits vara tillförlitliga.

En riktigt verklighetstrogen biosfärsmodell är svår att åstadkomma. De konceptuella modeller som använts dras med både osäkerhet och variation i indata /10-9/. Strukturen varierar med tiden och kan dessutom vara svår att förutsäga. Genom att behandla några olika schematiska enkla scenarier får vi ändå en bra bild av möjliga utfall. /10-35, 33/

### **10.3.9 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, Chalmers, Göteborgs Universitet, FOA4 samt i någon mån av Studsvik och Kemakta på uppdrag av SSI och SKI. I Norden kan även Risö i Danmark, VTT i Finland nämnas. Utöver dessa har ett stort antal institutioner studerat Tjernobylnedfallet och dess konsekvenser. Annan forskning om kemiska ämnen i miljön kan i vissa fall vara relevant.

## **10.4 PROGRAM 1993–1998**

### **10.4.1 Brunnar**

Metodiken för hur brunnar skall hanteras i säkerhetsanalysen skall bearbetas vidare med hänsyn till de riktlinjer som utfärdas av berörda myndigheter. Mindre insatser planeras, avseende kartläggning av förekomst, egenskaper och vad vattnet används till.

### **10.4.2 Transport genom sediment och jord**

En studie pågår för att finna ett alternativt sätt att modellera transport genom sediment och jord.  $K_d$ -konceptet är inte användningsfritt eftersom transporten passerar flera olika lager vilka dessutom inte är homogena. En termodynamisk ansats provas också.

Platsspecifika kvantitativa beskrivningar av vilka olika typer av recipienter som finns och kan tänkas finnas under de närmaste 1000 åren.

### **10.4.3 Biosfärens förändringar**

Inom de platsspecifika studierna behövs en bedömning av hur människan kan komma att utnyttja ekosystemen inom ett visst område t ex vad marken kommer att användas till under de närmaste 1000 åren.

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 kapitlet om Säkerhetsanalys. I programmet för bergets egenskaper kommer en kunskapsöversikt av istider och klimatförändringar dessutom att genomföras.

### **10.4.4 Naturliga analogier**

Sedimentens roll som långsiktig och eventuellt slutlig sänka för utsläppta radionuklider kommer att studeras mer ingående. Ett sätt att göra detta är att försöka kvantifiera nuklidrörelser (avfallsrelaterade eller kemiska analogier) vid "naturliga analogier"

som malmer, eller urlakningsskikt i torv. Från vissa moränmarker urlakas stora mängder lantanider, vilka bl a kan ge oss möjlighet att studera hur stor retensionseffekt man kan räkna med i organiska sediment. Koncentrationsfaktorerna för upptag i växter och torvens roll som nuklidkoncentrator bör också kunna kvantifieras.

#### **10.4.5 Transportvägar i biosfären**

Med anledning av Tjernobyl-olyckan initierades 1986 en studie av nedfallet i SKBs undersökningsområden, Gideå och Finnsjön. Dessa avses avslutas under 1993. 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. Målet för provtagnings och mätprogrammet är att kunna utnyttja migrationen av nukliderna i nedfallet för verifiering och validering av modeller som beskriver 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 förfinas. Modelleringen syftar till att beskriva migrationen av de olika nukliderna i ytliga delar av geosfären inkluderande grundvatten, berg, jord och biomassa.

Bindning av aktinider på organiskt material i jordar kan vara en väsentlig faktor för expositionsvägen via grönsaker, kött och mjölk. Komplexbindning av bl a jod kan ha stor betydelse. Betydelsen av osäkerheten i transuranernas omsättning kommer att utvärderas. Eventuellt kan experimentella studier behöva genomföras.

#### **10.4.6 Modeller och data**

Spridningsberäkningar i KBS-3 och SKB 91 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 /10-37, 38/.

Validering av modeller kommer fortlöpande att ske bl a internationellt inom VAMP eller BIOMOVIS och med hjälp av data från tjernobylnedfallet i Gideå och Finnsjön. Vissa av de parametrar som används i box-modellerna är fortfarande dåligt undersökta för nordiska förhållanden. Känslighetsanalyser kommer att i hög grad få avgöra vilka parametrar som kommer att studeras vidare under den kommande sexårsperioden, men en större vikt kommer att läggas vid att kunna ge ett modellresultat med väl underbyggd beskrivning av variation och osäkerhet.

#### **10.4.7 Platsspecifika studier**

För sådana fall där utsläppen inte börjar förrän efter många 10 000-tals år, då inlandsisen 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 stor roll för hur radionukliderna kan transporteras från berget till de lokala ekosystemen och vilka egenskaper utflödespunkterna har.

Vid scenarier där utsläpp kan beräknas ske inom några tusentals år, t ex vid en initial kapselskada blir platsen viktig för spridningen i lokala ekosystem, eftersom nuvarande förutsättningar för markanvändning m m, i stor sett, kan väntas kvarstå under denna tid.

Det är därför lämpligt att fortsätta platsspecifika modellstudier och även ta hänsyn till slutförvarets lokala påverkan. Den första studien på Äspö kommer att följas av

motsvarande studier avseende de kandidatplatser som föreslås för lokalisering av slutförvaret. Målet är att mindre generaliserade modeller kan användas.

#### **10.4.8 Acceptanskriterier**

Val av radiologiska acceptanskriterier har stor betydelse för hur biosfärsanalyser skall göras. Internationella organs arbete bör noga följas. De svenska myndigheterna kommer troligen att ange minimikrav, vilka SKB kan finna anledning att skärpa. I det sammanhanget kan jämförelser mellan modellberäkningar och observationer av utflöden av naturliga nuklider i människans omgivning t ex uranrik makadamproduktion, 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 givit anledning till en utredning inom IAEA /10-44, 45/. Utredningen konfirmerade i huvudsak ovanstående princip. SKB avser att följa utvecklingen.

# 11 TEKNIK FÖR DJUPFÖRVARING

## 11.1 ALLMÄNT

I och med att karakteriseringen av potentiella förläggningsplatser för djupförvaret inleds och projekteringen påbörjas av ett djupförvar för demonstrationsdeponering kommer den fortsatta utvecklingen av teknik för byggande och tillredning av förvaret och för deponering att inordnas i projekteringen av djupförvaret.

## 11.2 MÅL FÖR VERKSAMHETEN 1993–1998

Målet under perioden är att utveckla tekniken för genomförandet av djupdeponering av inkapslat bränsle, inklusive återfyllning och återtag, till en sådan mognadsgrad att detaljundersökningar (rampdrivning eller schaktsänkning) kan påbörjas kring 1998. Under första treårsperioden analyseras det prioriterade deponeringssystemets utvecklingsmöjligheter samt genomförs systemstudier och konceptuella konstruktioner av maskiner och metoder. Under andra treårsperioden aktualiseras studier i prototypskala av deponerings- och återtagningsutrustning, om sådana bedöms erforderliga före uppskalning till fullstor skala.

Byggmetoder förfinas i fråga om injektering i fina sprickor och i fråga om passage av starkt vattenförande zoner med stort vattentryck.

## 11.3 NUVARANDE KUNSKAPSLÄGE

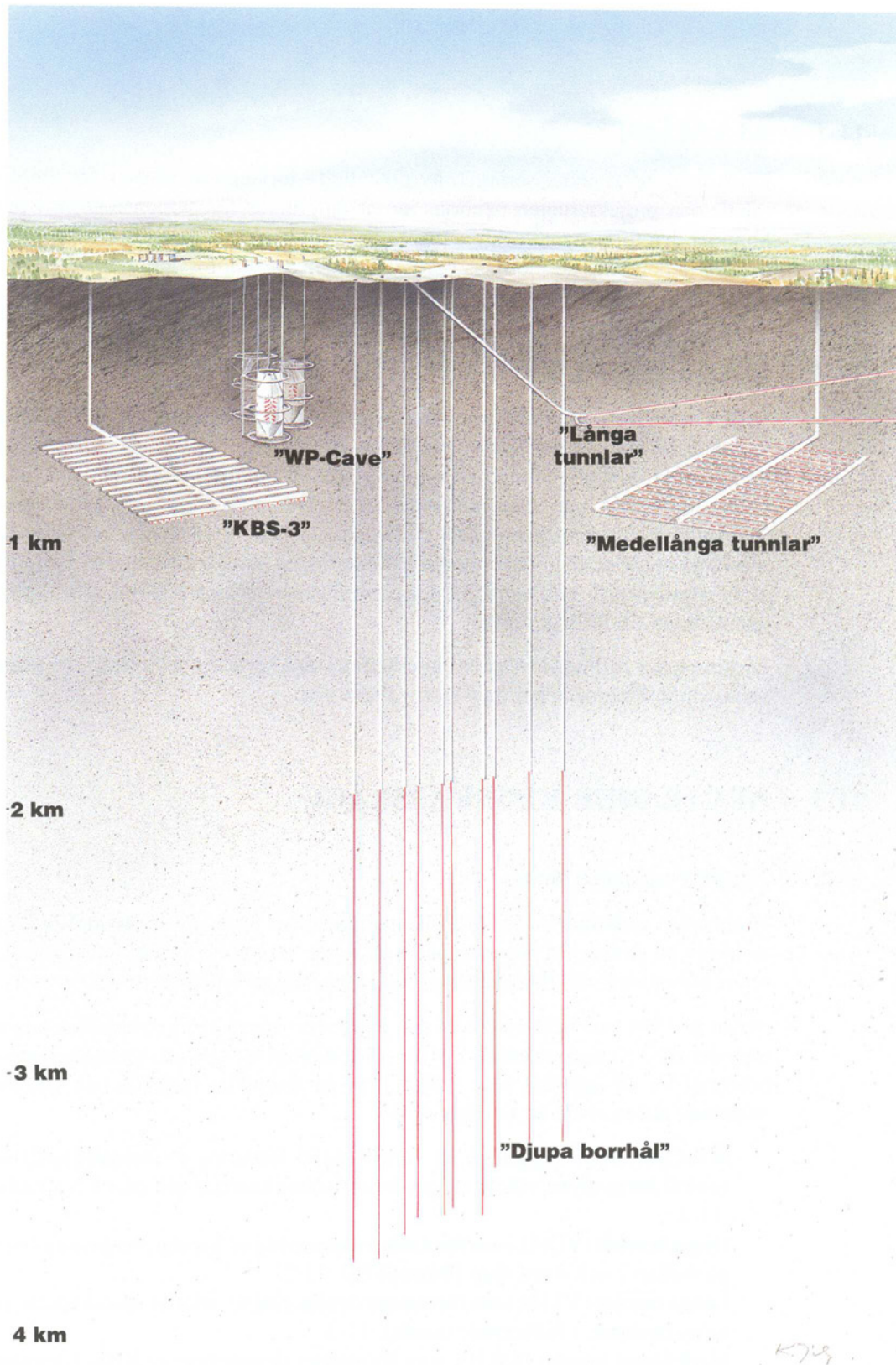
### 11.3.1 Djupförvaringssystem

Regeringen godkände år 1984 KBS-3-metoden som ett system som uppfyller samhällets krav på strålskydd och långsiktig säkerhet. Denna metod har sedan dess utgjort referensmetoden i SKBs forsknings- och utvecklingsverksamhet.

Sedan år 1984 har SKB utvecklat och analyserat några andra intressanta förvaringsmetoder med lyckade resultat. Det har varit möjligt att visa att också alternativen har potential för att uppfylla högt ställda krav på långsiktig funktion och säkerhet. De studerade alternativen är, se Figur 11-1:

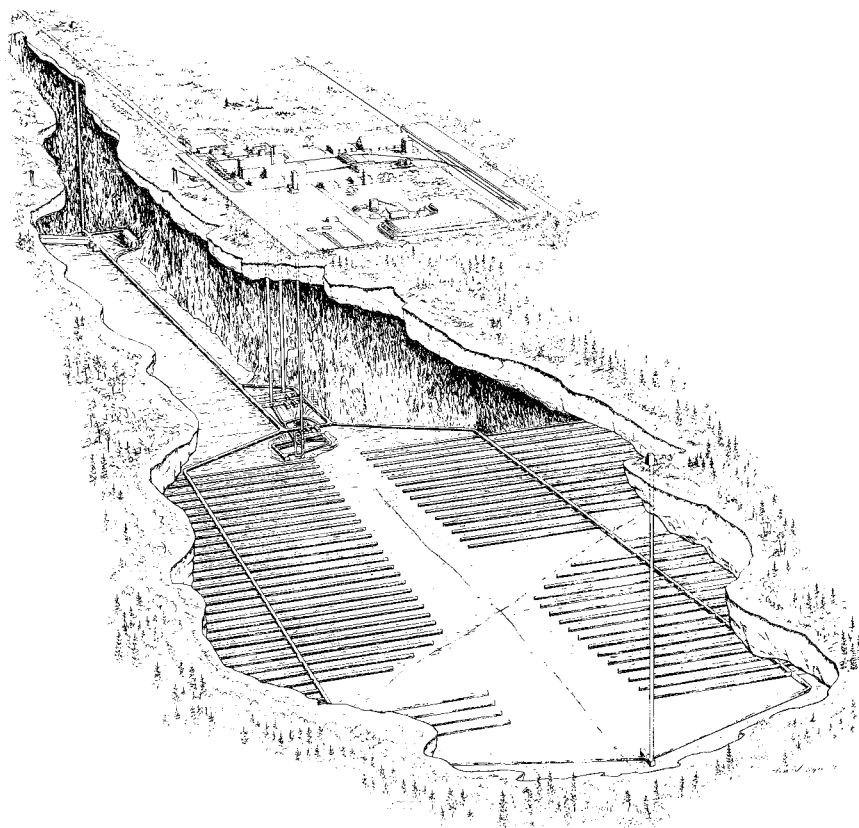
- WP-Cave, som bygger på en koncentrerad förvaring av bränslekapslarna i en central bergvolym, vilken omges av en bentonitbarriär och en sk hydraulisk bur /11-1/.
- Djupa borrhål (VDH), som förutsätter deponering av kapslar, omgivna av bentonit, på mellan 2 och 4 km djup i borrhål /11-2/.
- Långa tunnlår (VLH), som förutsätter deponering av relativt stora kapslar, omgivna av bentonit, i fullborrade tunnlår /11-3/.
- Medellånga tunnlår (MLH), som förutsätter deponering av KBS-3-kapslar, omgivna av bentonit, i rad i fullborrade tunnlår /11-4/.

Vid jämförelser av dessa alternativa metoder med KBS-3-metoden har KBS-3-metoden framstått som den fördelaktigaste (WP-Cave / KBS-3 i /11-1/ och VDH/VLH/MLH/KBS-3 i /11-4/). Deponering av inkapslat avfall i borrhål i sulan av ett



Figur 11-1. Illustration av studerade djupförvaringsmetoder.





*Figur 11-2. Djupförvar enligt KBS-3 – översikt.*

system av deponeringsorter utgör därför referensmetoden också i det fortsatta utvecklingsarbetet.

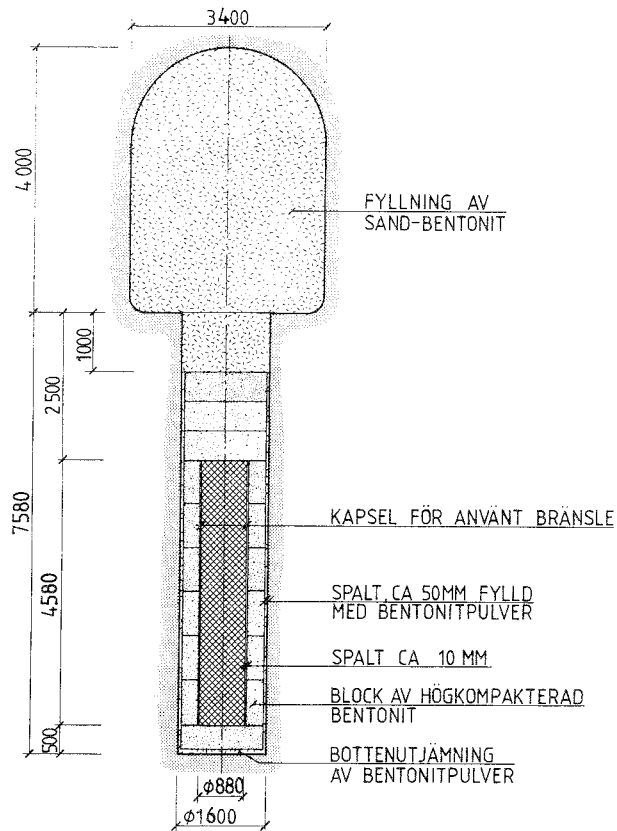
### **11.3.2 Prioriterad förvarsutformning**

Djupförvaret består av en serie parallella deponeringstunnlar i ett plan, vilka är förbundna med transporttunnlar. Layouten illustreras i Figur 11-2. Deponeringsnivån kan nås från dagen antingen via enbart schakt, som Figur 11-2 visar, eller via ramp och serviceschakt.

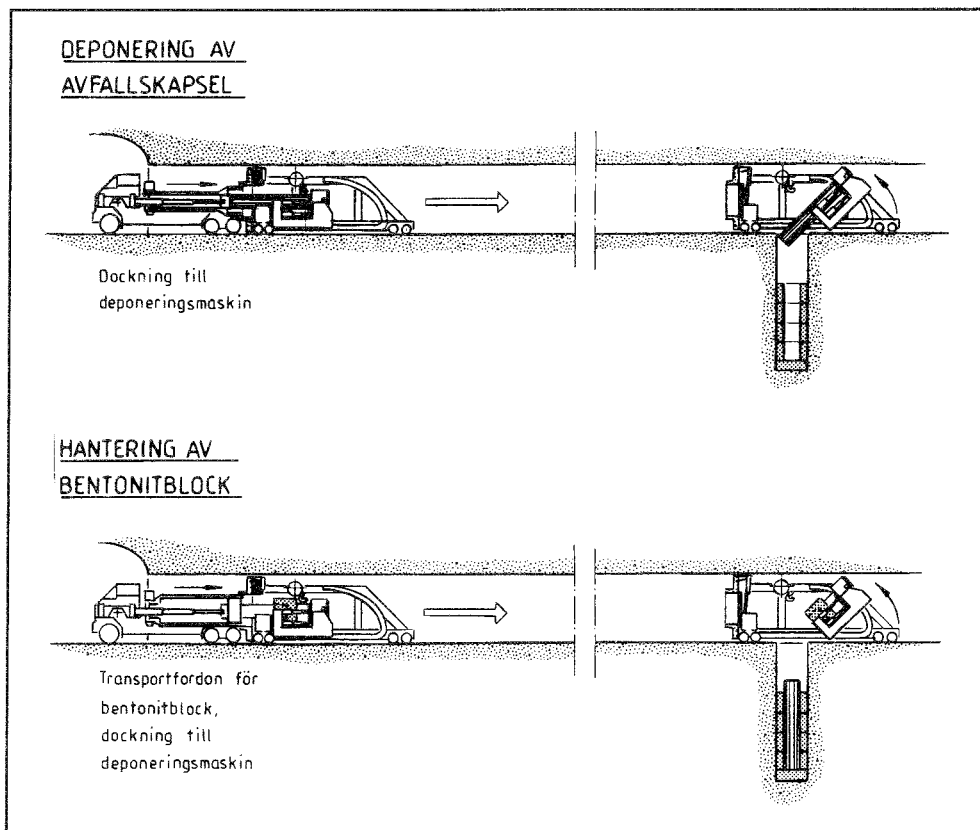
Avfallskapslarna placeras i borrarade vertikala hål i tunnelbotten och omges av högkompakterade bentonitblock. En genomskärning av ett deponeringshål visas i Figur 11-3.

Kapslarna transporteras från dagen till deponeringsnivån i en avskärmd hiss (schaktalternativet) eller i en strålskyddad transportbehållare i en snedbana (rampalternativet). På nivån körs kapseln fram till den aktuella deponeringstunnel, där kapseln förs över till ett speciellt deponeringsfordon, som hanterar kapslar och bentonit inne i deponeringstunneln. Fordonet kör in i tunneln. När kapseln befinner sig över deponeringshålet reses kapseln till vertikalt läge och sänks ner i hålet. Den nedre delen av bentonitbufferten finns då redan på plats. Efter kapselplaceringen fyller deponeringsfordonet igen resten av hålet. Deponeringssekvensen framgår av Figur 11-4.

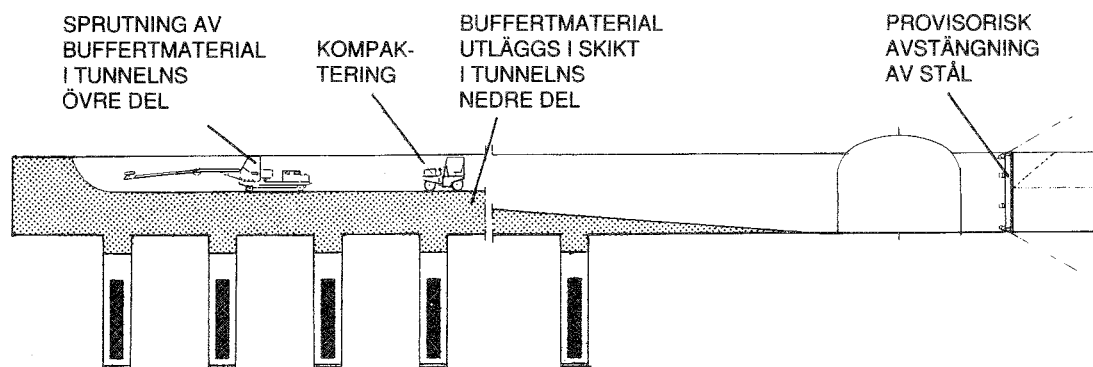
Slutligen återfylls deponeringstunneln med en blandning av bentonit och sand, som illustreras i Figur 11-5.



Figur 11-3. Deponeringshål med kapsel och bentonitbuffert.



Figur 11-4. Principen för deponering av kapsel och placering av bentonitbufferten.



*Figur 11-5. Återfyllning av deponeringstunnel.*

Utformningen med kapslar i vertikalt borrade hål valdes ursprungligen för att kapslarna skulle placeras i ostört berg, utanför den störda zon man visste kunde utbildas runt en sprängd tunnel. Dessutom eftersträvade man att hålla varje kapsel tillräckligt isolerad från kringliggande kapslar för att omöjliggöra transport mellan kapslarna av fissilt material. En fördel man också får med en sådan utformning är att deponeringen av varje kapsel blir en avslutad process med föga påverkan på deponeringen av kringliggande kapslar.

Den mycket höga säkerhetsnivå som redovisas i SKB 91 /11-5/ förutsätter en väl genomförd inkapsling, deponering och återfyllning av förvaret.

### 11.3.3 Teknik för tillredning och deponering

#### Allmänt

Tillfarten sker via vertikalt schakt eller ramp i lutning. På förvarsnivån tillreds centralområdet. Transporttunnlar och deponeringstunnlar drivs. Sist borrar deponeringshålen.

Metoderna för tillredning av djupförvaret, deponering av kapslarna samt återfyllning med bentonit runt kapslarna bygger på känd teknik alternativt anpassning av känd teknik enligt etablerad ingenjörspraxis till de speciella appliceringar som föreligger.

Svaghetszoner och kraftigt vattenförande berg kan ställa till praktiska problem vid tillredningen och tillgängliga, tekniska möjligheter behöver analyseras innan detaljundersökningar (tillredning och undersökning under jord) påbörjas.

### **Borrning-sprängning-fullborrning**

Konventionell borrning och sprängning förutsättes användas i stor utsträckning. Med hjälp av slätsprängningsteknik kan påverkan på bergväggarna i tunnlar och rum minskas, om detta är önskvärt.

I en speciell sprängskadeundersökning i Äspörampen /11-6/ analyserades skadorna i bergväggen för tre olika borrlanor. Resultatet visade att man hade begränsat skadezonen till ca tre decimeter i väggar och tak medan bottenregionen påverkades mer än en meter under sulan.

Vid fullborrning påverkas bergväggen betydligt mindre än vid sprängning /11-7/.

Mekanismer och parametrar som styr den zon som påverkas av borrning/sprängning respektive fullborrning är dock ofullständigt kända. Försök planeras genomföras i Äspölaboratoriet, se underlagsrapporten till FUD-program 92 angående Äspölaboratoriet.

### **Bergarbeten**

Sänkning av schakt eller drivning av ramp med borrning och sprängning kan anpassas efter mycket skiftande förhållanden.

Användandet av fullborrningsteknik eller mekanisk brytningsmetod medför en potentiell fördel ur långsiktig säkerhetssynpunkt, eftersom berget närmast schaktet eller rampen då störs mindre än vid sprängning.

Fullborrning av schakt har länge tillämpats i mjuka bergarter, men på senare tid också i hårda. Det är möjligt att borra skipschaktet, som är det som planeras att sänkas i schaktalternativet. (Övriga schakt stigortborras.) Priset torde dock bli högre än för konventionell sänkning idag.

Moderna erfarenheter finns från borrning med Tunnel Boring Machine (TBM) i hårt berg i Sverige; två tunnlar under Stockholm (3,5 m diameter) samt en tunnel i Klippens kraftverksstation (6,5 m diameter i bl a lutning 1:10 nedåt). Denna teknik är i första hand intressant för en ramp till deponeringsdjupet.

Utrustning för mekanisk brytning i hårt berg i olika tunnelprofiler provades redan på 70-talet av Atlas Copco. En modern utrustning har tillverkats av Robbins och använts i gruvan Mount Isa i Australien med gott resultat. Den maskinen har ett hjul med kuttrar längs periferin, vilket sitter på en rörlig arm. En andra, kraftigare generation av denna maskintyp levererades i början på 1992 till Pismincos gruva i Broken Hill, Australien. Berggrunden i bägge gruvorna består av hårt berg, prekambrisk leptiter, med en tryckhållfasthet på 150–400 MPa. Tekniken medför en hög avverkningskapacitet, vilket lett till att ett stort intresse visats för utvecklingen från såväl gruv- som entreprenadindustrin.

De 7,5 m djupa deponeringshålerna med diametern 1,6 m fullborras. En utrustning som klarar denna borrning med endast ca 3,5 m i takhöjd finns på ritbordet /11-8/.

### **Bergförstärkning**

I undermarksbyggande och gruvbrytning används en rad förstärkningsmetoder allt efter det berg man arbetar i. Av tekniska/ekonomiska skäl utnyttjas ofta betong i dåliga partier. Ytterst sällan avbryts arbeten därför att det ej tekniskt går att klara problemen, utan därför att kostnaderna blir för höga. Användandet av betong kan emellertid komma att begränsas i ett djupförvar, eftersom den kemiska miljön med neutralt pH och små mängder av lättillgängligt kalcium är av stor betydelse för de tekniska barriärernas långsiktiga funktion. I stället för eller som komplement till betong behöver beredskap finnas för användning av andra metoder.

## **Injektering**

Injektering används regelbundet för avtätning av vatteninflöde till berggrum. Stor erfarenhet finns om olika bruk och om olika tillsatser. Kommersiellt använda bruk är huvudsakligen cementbaserade men även plastbaserade finns på marknaden.

### *Fina sprickor*

I Stripa-projektet studerades användningen av både cementbaserade material och bentonit som injekteringsmedel i finare sprickor i områdena närmast deponeringspositionerna.

Man fann att deponeringshålen kan tätas mot vatteninflöde med hjälp av bentonit /11-9/. Tätningen görs efter det att hålet borrats. Megamanschetter med en smal spalt mellan manschetten och bergväggen installeras längs den zon som skall tätas, varefter injekteringsmaterialet trycks in. Bästa effekten i fina sprickor erhöles via applicering av ”dynamisk” injektering, innebärande att ett oscillerande tryck las på det ordinarie statiska injekteringstrycket. Metoden kan i första hand tjäna syftet att hindra vatteninläckning under själva deponeringen.

Förinjektering med cementbaserade material gav också goda resultat vid applicering av ”dynamisk” injektering i borrhål.

Däremot var resultaten negativa i fråga om fina sprickor i berg som skjuvats och nötts mekaniskt vid sprängning. Orsaken tros vara att fina bergfragment slits lösa i sprickorna och täpper till kanalen för intransporten av injekteringsmaterialet.

### *Grova sprickor*

Grova sprickor med stor vattenföring och högt vattentryck skapar praktiska problem, som t ex erfarits i Äspörampen.

Beredskapen mot denna typ av svårigheter består idag huvudsakligen i kännedomen om ett antal olika injekteringsmaterial och erfarenheten från projekt där dessa använts med goda eller dåliga resultat. Utifrån denna kunskap löses den praktiska svårigheten främst genom att material och metoder provas till dess man lyckas täta av.

I Stripaprojektet utvecklades modeller för injekteringsmaterials egenskaper och förväntade uppträdande i olika sprickor. Dessa modeller går också att använda på grövre sprickor. För att kunna åstadkomma en god beskrivning av verkligheten behövs också kunskap om vissa sprickegenskaper. Dessa är emellertid svåra att mäta och bestämma, vilket hämmar möjligheterna att prediktera injekteringsinsatser och injekteringsresultat.

## **Deponering och återtag**

Fordonet för deponering av kapslar och placering av bentonitbufferten är specialutformat. En första konstruktionsskiss finns i dag på ritbordet. Den bearbetas vidare genom konstruktionsstudier och riskanalysering av deponeringsprocessen. Därefter aktualiseras frågan om eventuell prototypupprovning innan underlag för tillverkning av fullstora fordon tas fram.

I händelse av allvarliga avbrott under deponeringsförfarandet finns det situationer som bäst åtgärdas med att kapseln under deponering tas tillbaka och deponeringsförfarandet tas om från början. Återtag av deponerad kapsel utgör också en komponent i demonstrationsdeponeringen, som förutsätter att kapslar kan hämtas upp till markytan även efter det att deponeringstunnlarna återfyllts och försegats.

Utrustning för återtag av kapsel (och utgrävning av buffermaterialet) utvecklas parallellt med utrustningen för deponeringen.

Bentonitblocken runt kapslarna kompakteras i en anläggning ovan jord. Tekniken är känd och kompakteringsutrustning finns i många utföranden för varierande applikationer. Däremot är ej själva hanteringen av bentoniten klargjord och ej heller hur stora block som kan tillverkas med bibehållen, jämn täthet i blocket och utan stora, ojämna spänningar.

Blocken för Buffer Mass Test i Stripa tillverkades i en befintlig anläggning. Bentoniten i dessa hade "normal" fuktighet, innebärande att delar av porutrymmet var gasfyllt (luft). Fuktmättad bentonit, i den bemärkelsen att porvolymen från början är så gott som vattenmättad, har emellertid ej provats. Fördelarna med en högre fukthalt från början är att buffertzonen för en initialt högre termisk konduktivitet, vilket sänker temperaturtoppen i bufferten. Dessutom minskar syremängden något i närheten av kapseln innan bufferten mätts med vatten. I händelse av salt grundvatten undviks också den potentiella risken för saltanrikning i bufferten under vattenmättnadsfasen.

### **Återfyllning**

Deponeringsorterna återfylls med en blandning av sand och bentonit, som är billigare än ren bentonit. Den nedre delen av lagret kan läggas ut i skikt och kompakteras på platsen med vanliga vibratorer. Den övre delen mot taket måste återfyllas på annat sätt.

I Stripaprojektet sprutades en blandning med 20% bentonit och 80% sand in med sprutbetongutrustning. Tätheten blev dock ej tillräckligt hög för att återfyllnadsmaterialet skulle få ett så pass stort svälltryck att sand/bentonitblandningen kan stötta tunnelns tak och förhindra krypdeformation /11-10/. Ett bättre stöd kan uppnås antingen genom att använda en betydligt bentonitrikare blandning, vilket dock är kostsamt, eller genom att applicera någon sorts in-situkompaktering.

### **Pluggning**

När deponeringen avslutats kommer förvaret att förslutas genom återfyllning av tillredda områden. Tunnlar och schakt pluggas på strategiska ställen. Dessa pluggar kan byggas av betong och bentonit, vilket visats med försök i Stripa /11-11, 11-12/.

Pluggarna med de provade utformningarna tätade effektivt av kanaler för vattentransport inne i tunneln (eller schaktet). I närberget strax utanför pluggen kvarstår emellertid eventuella axiella kanaler i den störda zonen. Dessa bedöms också behöva tätas, vilket kan ske genom att slitsar fräses ut i bergväggen så att pluggen får en större diameter än tunneln. Injekteringskärmar kan därtill läggas runt pluggen. Utformning och effekter har emellertid ej analyserats i detalj.

Också borrhål behöver tätas med pluggar. Metod och utformning har utvecklats i Stripaprojektet /11-13/. Kompletterande fältförsök i långa hål kan genomföras i Äspölaboratoriet.

## **11.4 PROGRAM 1993–1998**

### **Systemstudier**

Olika utvecklingsmöjligheter av KBS-3-utformningen analyseras under den första treårsperioden. Främst avses erforderlig höjd i deponeringstunnlarna och deponeringshål för två kapslar ovanpå varandra.

Förutsättningarna analyseras för schakt respektive ramp som kommunikationsväg mellan markytan och förvaret.

VDH-systemet har rangordnats lägst i PASS och kommer ej att studeras vidare som ett sammanhållet system. Däremot har studierna identifierat en betydelsefull barriärpotential i den mot djupet ökande salthalten. Den modellering av barriärfunktionen som påbörjats fullföljs. Dessutom bevakas den nya geoinformation som kan komma fram genom djupborringarna samt annan information som är av vikt för ett KBS-3-förvar på ca 500 m djup under markytan, se avsnitt 6.5.

### **Byggmetoder**

Försök görs med maskin för fullborring av deponeringshålen.

Injekteringsmetoder för tätning av fina sprickor med megamanschetter vidareutvecklas. Praktiska försök förläggs till Äspölaboratoriet.

Metoder bearbetas för passage av vattenförande sprickor med högt tryck. Provgenomgång av någon zon på laboratorienivån i Äspö övervägs.

### **Deponering – återtag**

Deponerings-och återtagningsutrustningen utvecklas i flera steg. I ett första utarbetas konstruktionsritningar över fullstora enheter. Därefter övervägs om framför allt deponeringsfordonet behöver byggas och utprovas i prototypskala innan tillverkning i fullstor skala kan påbörjas. Under perioden genomförs konstruktionsarbetet och eventuella prov i prototypskala.

Utveckling av teknik för rationell framställning av bentonitblock påbörjas. Arbetet avser framställning av block med såväl låg som hög vattenkvot.

### **Återfyllning och tätning av tunnlar och schakt**

Fram till 1995 utvecklas lämplig strategi för återfyllning av deponeringstunnlarna. Härvid undersöks såväl sammansättning, packningsbarhet och långtidseffekten hos olika blandningar, som utrustning för att uppnå tillräcklig packningsgrad för dessa.

Pluggar för avtätning av tunnlar och schakt vidareutvecklas. Provpluggar kan övervägas i de försök i Äspölaboratoriet där storskaliga försök med buffertmaterial sker och bufferten skall stängas inne.

## 12 ÖVRIGT AVFALL

### 12.1 BAKGRUND

I Sverige erhålles huvudsakligen två typer av radioaktivt avfall: använt bränsle och kortlivat låg- och medelaktivt avfall. Det låg- och medelaktiva avfallet utgörs till helt övervägande del av avfall från drift av kärnkraftanläggningar. Ett mindre tillskott kommer från forskning, industri och sjukvård. Det här avfallet skall slutförvaras i SFR som redan är i drift. Även radioaktiva delar och avfall som uppstår då kärnkraftanläggningarna så småningom rivs kommer att placeras i en utbyggnad av SFR.

En tredje kategori av avfall utgörs av långlivat låg- och medelaktivt avfall. I Sverige kommer endast en relativt liten mängd sådant avfall att behöva tas om hand. Det utgörs huvudsakligen av avfall från forskningsverksamheten i Studsvik. Sådant avfall tas omhand, mellanlagras och konditioneras i Studsvik. En del komponenter från kraftproducerande reaktorer i eller i närheten av reaktorhärden innehåller långlivad aktivitet och kan också hänföras till den här typen av radioaktivt avfall, liksom även visst kommande avfall från inkapslingsanläggningen för använt bränsle. Avfallet konditioneras i cement och förpackas i behållare av plåt (fat) eller betong. Till sin form liknar således det här avfallet det som skickas till SFR, men nuklidsammansättningen är annorlunda. Den totala volymen av långlivat låg- och medelaktivt avfall som till slut skall slutdeponeras uppskattas till ca 20 000 m<sup>3</sup>.

Betydligt större mängder av långlivat låg- och medelaktivt avfall erhålles i de länder som upparbetar sitt använda kärnbränsle. Vid upparbetning frigörs långlivade radionuklider, främst transuranelement, från bränslematrisen då denna kemiskt löses upp. Det mesta återanvänds, t ex plutonium och uran, eller hamnar i det högaktiva avfallet. I processen uppstår dock även relativt stora volymer låg- och medelaktivt avfall med långlivade radionukliderna, t ex filtermassor, indunstarkoncentrat och kontaminerade sopor och skrot av olika slag.

Utan upparbetning stannar transuranerna och andra långlivade nuklider kvar i bränslet och kan kapslas in som högaktivt avfall.

### 12.2 AVFALLETS SAMMANSÄTTNING

#### 12.2.1 Avfall från forskningsverksamhet i Studsvik

I Studsvik behandlas fast avfall och vätskor. Det fasta avfallet består av bl a tyg, trä, papper, plast (PVC, plexiglas etc.), gummi, glas, järn, rostfritt stål aluminium och titan. Även en del kadmium ingår. Avfallet packas i fat som placeras i betongkokiller. Handskboxar för arbete med alfaaktiva radionuklider har skrotats och här har man använt innerkärl av rostfritt stål. Till och med 1990 hade man producerat ca 100 kokiller. Då hade man även drygt 16 st 200 l fat med betongingjutet slam från behandling av flytande avfall med alfaaktivitet. I Studsvik förvaras även alfaaktivt avfall från tidigare forskningsverksamhet som ännu inte konditionerats. Det kommer att behandlas i Studsvik på samma sätt som ovan.



Det finns på Studsvik även äldre konditionerat avfall som innehåller plutonium respektive uran. Det rör sig bl a om drygt 400 fat betongingjutet plutoniumhaltigt avfall.

Från forskningsverksamheten i Studsvik finns även bränslerester, dvs bitar av bränslepinnar, lösa bränslekutsar eller provbitar, som erhållits vid efterbestrålningssundersökningar av bränsle. Bränsleresterna kapslas in i stålrör och förs till CLAB för mellanlagring. De skall därefter tas om hand för inkapsling på samma sätt som det använda bränslet. Bränsleresterna diskuteras inte mer i det följande.

I Studsvik tas även en del långlivat avfall från användning av radioaktiva källor i medicin, forskning och industri om hand.

### **12.2.2 Härdkomponenter och interna delar**

Delar i reaktorhärden och dess omedelbara närhet utsätts under reaktorns drift för ett mycket starkt neutronflöde. Därvid har materialet i komponenterna erhållit inducerad aktivitet. Det som då bildas är huvudsakligen kortlivade ämnen som Co-60, men även vissa långlivade nickel- och niob-isotoper. Co-60-halten är så hög att härdkomponenterna behöver kraftig strålskärmning under lång tid (> 50 år).

Exempel på härdkomponenter är styrtstavar, neutrondetektorsonder, neutronkällsonder, och borplåtar. Till härdkomponenterna räknas även bränsleboxar från BWR-bränsle om dessa separeras från bränslet. Exempel på interna delar med hög inducerad aktivitet är härdgaller och patronuppställningsplattor.

Detta avfall transporteras till CLAB för mellanlagring. Därefter avses det bli ingjutet i betongkokiller och deponeras i djupförvaret för övrigt långlivat avfall.

### **12.2.3 Avfall från inkapslingsstationen**

Avfallet från drift och rivning av inkapslingsstationen kommer inte att skilja sig nämnvärt från de andra kärntekniska anläggningarna dvs till helt övervägande delen kommer det att utgöras av låg- och medelaktivt avfall av den typ som kan gå till SFR. Skulle man besluta att stänga SFR medan inkapslingsstationen ännu är i drift så erbjuder förvaret för långlivat lågaktivt avfall ett alternativ. Vid missöden där bränsle går sönder kan dock även en del av avfallet bli klassat som långlivat.

## **12.3 SLUTFÖRVARING**

De kemiska egenskaperna hos det långlivade avfallet skiljer sig inte nämnvärt från vad som förekommer i SFR. En liknande anläggning för slutförvaring kommer därför att byggas. Emellertid kommer det högre innehållet av långlivad aktivitet att ställa större krav på den långsiktiga säkerheten. Efter tusen år finns långlivad aktivitet alltså kvar i betydelsefulla kvantiteter för säkerheten, men t ex betongkonstruktioner kan ha förändrats liksom avfallsformen själv.

Slutförvaringen av det långlivade avfallet (och visst annat driftavfall som uppstår efter att SFR har stängts) planeras ske i nära anslutning till djupförvaret för använt bränsle. I PLAN 92 visas de samlokaliserade, varvid samma avfalls- och persontransportschakt används. Förvarsutrymmena för långlivat avfall benämns SFL3 och SFL5. För att undvika störningar på djupförvaret för använt bränsle har SFL3 och 5 placerats på ca 1 km avstånd. Tunneln mellan de olika förvarsdelarna kommer att förslutas på samma sätt som deponeringstunnlarna i bränsleförvaret, dvs med en sand-bentonitblandning.

SFL3, där Studsviksavfallet och avfallet från BS skall placeras består av en bergsal, där avfallet staplas i betongceller och kringgjuts med betong. Utrymmet mellan betongcellerna och berget fylls med sand-bentonitblandning. All hantering sker fjärrstyrt med travers. Principen för barriärerna i SFL3 överensstämmer med siloförvaret i SFR.

SFL5, där betongkokiller med härdkomponenter mm skall deponeras, består av två 350 m långa tunnlar. Betongkokillerna transporteras in med en fjärrstyrd travers och staplas på varandra. Efter instapling kringgjuts de med betong.

Efter avslutad deponering i SFL3 och 5 (samt SFL4 för rivningsavfall från CLAB och inkapslingsstationen) försluts tunnarna med sand-bentonit.

Stora mängder av långlivat låg- och medelaktivt avfall erhålles i länder som låter upparbeta sitt använda bränsle, t ex USA, Frankrike, Storbritannien, Tyskland och Schweiz.

I USA har ett slutförvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall byggts i en saltformation i New Mexico. Anläggningen, WIPP (Waste Isolation Pilot Plant), är en testanläggning och kommer i första hand att användas för avfall från det amerikanska militära programmet.

I Sellafield i England pågår undersökningar för ett förvar på ca 800 meters djup. Flera provborringar har utförts i området kring Sellafield. Tidigare har man även undersökt Dounreay i Skottland. Undersökningarna leds av NIREX, Nuclear Industry Radioactive Waste Executive, som har ansvaret för att genomföra undersökningar och planera för slutförvaring av låg- och medelaktivt avfall i England. Enligt ett allmänt förvarskoncept för långlivat låg- och medelaktivt avfall som presenterades 1989, så tänker man sig att avfallet placeras i 26 st 250 m långa gallerier. Avfallet konditioneras huvudsakligen med cement och packas i stålfat. Betong används för konstruktionerna under jord och som återfyllnadsmaterial.

I Tyskland har man undersökt möjligheterna att bygga ett djupförvar för långlivat låg- och medelaktivt avfall i den nedlagda järnmalmsgruvan Konrad. Förvaret skall ligga på ca 1000 meters djup. Ansvaret för omhändertagandet av radioaktivt avfall i Tyskland ligger hos BfS, Bundesamtes für Strahlenschutz. En ansökan om att få använda Konrad för det här ändamålet har lämnats in till ansvariga myndigheter.

Även i Schweiz planeras underjordsdeponering av sådant här avfall. Från bl a upparbetningen av Schweiziskt bränsle i Frankrike räknar man med att få tillbaka låg och medelaktivt avfall för deponering. Undersökning och planering leds av NAGRA, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle.

SKB kommer att följa utvecklingen och dra nytta av erfarenheterna för att utforma och planera deponeringen av det svenska långlivade låg- och medelaktiva avfallet. I en internationell jämförelse är våra mängder av detta avfall små eftersom vi inte avser att upparbeta det använda bränslet.

## 12.4 MÅL FÖR VERKSAMHETEN 1993–1998

Projektering och byggande av anläggningar utöver de som erfordras för demonstrationsdeponering kommer att påbörjas tidigast några år in på 2000-talet. Målet för undersökningar rörande övrigt avfall under den kommande sexårsperioden är att:

- Inventera och karakterisera befintligt och förutsett avfall av denna typ.
- Bearbeta utformningen av djupförvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall.
- Förbereda och ta fram underlag till erforderliga säkerhetsanalyser.

## 12.5 PROGRAM FÖR 1993–1998

Inventering och karakterisering av avfallet innefattar inte enbart radionuklidinnehållet i avfallet. Det är också viktigt att känna till sammansättningen på avfallet, de material som ingår, hur avfallet har konditionerats och förpackats etc. Dokumentation om avfallet kommer att sammanställas efter hand som avfallet konditionerats och förpackas. En checklista över vilka komponenter som kan ha betydelse för den långsiktiga säkerheten håller på att utarbetas. Denna överensstämmer i mångt och mycket med motsvarande lista för SFR.

Slutförvaret för långlivat avfall skall enligt gällande planer inte byggas förrän i samband med andra etappen av djupförvaret. Något detaljarbete med utformningen av slutförvaret planeras därför inte inom den aktuella perioden. Gällande översiktliga förslag till utformning kan tills vidare användas för de förberedande säkerhetsstudierna.

Säkerhetsanalysen kommer att behöva information på en rad olika områden. Utöver avfallets sammansättning, förvarets utformning och förvarsplatsens geogenskaper behöver en rad specifika frågor utredas. Det gäller t ex betongens fysikaliska och kemiska förändring med tiden, betongens påverkan på omgivningen, eventuell gasutveckling, bildning och betydelse av organiska komplex och kolloider, löslighet och sorption av radionuklider i och utanför förvaret, diffusion av radionuklider i betong och eventuell återfyllnad osv. Olika scenarier behöver behandlas och modeller tas fram som beskriver frigörelsen ur närområdet och transport i fjärrområdet av eventuellt utläckande nuklider.

I ett inledande skede som kommer att vara några år framåt så kan insatserna beträffande övrigt långlivat avfall i stor utsträckning inskränkas till inventering av avfallet och att noga följa det internationella arbetet med att utveckla och analysera djupförvaring av långlivat låg- och medelaktivt avfall. Intresset är främst riktat till Storbritannien, Tyskland, Frankrike och Schweiz.

En del undersökningar av experimentell natur, som tar lång tid att genomföra, kan behöva starta tidigare. Det här kan med fördel integreras med de fortsatta undersökningar som planeras för SFR. Det är liknande frågor som behöver behandlas och som i stor utsträckning berör kemiska förändringar under lång tid.

Naturliga analogier, där hyperalkaliska kemiska förhållanden varit rådande i tiotusentals år, kan ge information om den miljö och de reaktioner som betong ger upphov till. En sådan analogi är förekomsterna av portlandit och hyperalkaliska grundvatten i Maqarin i Jordanien, se avsnitt 9.4.

Djupförvaring av låg- och medelaktivt avfall skiljer sig från SFR genom att berget i högre grad kan utnyttjas som barriär. Flertalet av de frågor som berör flöde av grundvatten på förvarsdjup och migration av radionuklider i geosfären är gemensamma med det högaktiva avfallet. De geundersökningar som pågår och planeras för Äspölaboratoriet är därför i hög grad relevanta även här. Bl a så planeras experiment med radionuklidmigration i driftskedet för Äspölaboratoriet. Det ger tillfälle att pröva en del av de förhållanden som styr frigörelse och transport av radionuklider från ett förvar med cementkonditionerat avfall.

# REFERENSER

## *Kapitel 1*

- 1-1 SKB Kärnkraftens slutsteg PLAN 92. Kostnader för kärnkraftens radioaktiva restprodukter.  
Juni 1992
- 1-2 Kärnbränslecykelns slutsteg. Använt kärnbränsle – KBS-3. Del I-IV. SKBF/KBS, Stockholm.  
Maj 1983
- 1-3 **Peltonen E K, Ryhänen V, Salo J-P, Vieno T K and Vuori S J**  
Concept and Safety Assessment for Final Disposal of Spent Nuclear Fuel in Finland. Proc. Int. Symp. on Siting, Design and Construction of Underground Repositories for Radioactive Wastes. IAEA, Wien 1986, pp 611-624.
- 1-4 PROJEKT GEWÄHR 1985. NAGRA Projektbericht NGB 85-01 – NGB 85-08, Baden.  
Januar 1985
- 1-5 Technical Appraisal of the Current Situation in the Field of Radioactive Waste Management. A Collective Opinion by the Radioactive Waste Management Committee.  
OECD/NEA, Paris.  
1985
- 1-6 Disposal of Radioactive Waste: Can Long-term Safety be Evaluated? An International Collective Opinion. NEA – IAEA – CEC. OECD/NEA, Paris.  
1991
- 1-7 SKB 91. Slutlig förvaring av använt kärnbränsle. Berggrundens betydelse för säkerheten.  
SKB, Stockholm.  
Maj 1992
- 1-8 SKN. FoU-program 89. Kärnbränslenämndens utvärdering.  
Mars 1990
- 1-9 Miljödepartementet. Program för forskning m m angående kärnkraftsavfallets behandling och slutförvaring.  
Regeringsbeslut 21. 1990-12-20
- 1-10 WP-Cave – Assessment of feasibility, safety and development potential.  
SKB Technical Report 89-20, Stockholm.  
September 1989
- 1-11 **Juhlin C, Sandstedt H**  
Storage of nuclear waste in very deep boreholes: Feasibility study and assessment of economic potential. Part I: Geological considerations 1). Part II: Overall facility plan and cost analysis 2).  
SKB Technical Report TR 89-39, Stockholm.  
December 1989.

- 1-12 Sandstedt H, Wichmann C, Pusch R, Börgesson L, Lönnerberg B**  
Storage of nuclear waste in long boreholes.  
SKB Technical Report TR 91-35, Stockholm.  
August 1991
- 1-13** SKB Annual Report 1991  
Including Summaries of Technical Reports Issued during 1991.  
SKB Technical Report TR 91-64, Stockholm.  
May 1992
- 1-14** Underlagsrapport till FUD-program 92  
Kärnkraftavfallets behandling och slutförvaring  
Äspölaboratoriet.  
SKB, Stockholm.  
September 1992
- 1-15** Underlagsrapport till FUD-program 92  
Kärnkraftavfallets behandling och slutförvaring  
Lokalisering av ett djupförvar.  
SKB, Stockholm.  
September 1992

## ***Kapitel 2***

- 2-1** Se 1-7.
- 2-2** Kärnbränslecykelns slutsteg. Använt kärnbränsle – KBS-3.  
SKBF/KBS, Stockholm.  
Maj 1983
- 2-3** SKI Project-90.  
SKI Technical Report 91:23, Statens Kärnkraftsinspektion, Stockholm.  
1991
- 2-4** PROJEKT GEWÄHR 1985.  
Nagra Projektbericht NGB 85-01 – NGB 85-08; NAGRA Baden.  
Januar 1985
- 2-5** **van Kote F et al.**  
PAGIS – Etude des Performances de Systèmes d’Isolement Géologique pour  
déchets radioactifs. Enfouissement dans des formations granitiques.  
EUR 11777 FR. CEC, Bruxelles-Luxembourg.  
1988
- 2-6** Preliminary comparison with 40 CFR Part 191 Subpart B for the Waste Isolation  
Pilot Plant.  
Sandia Report SAND 91-0893, Albuquerque.  
December 1991
- 2-7** Report of Early Site Suitability Evaluation of the Potential Repository Site at  
Yucca Mountain, Nevada; SAIC-91/8000.  
January 1992
- 2-8** Feasibility of disposal of high-level radioactive waste into the seabed.  
Volumes 1-8, OECD Nuclear Energy Agency; Paris.  
1988

- 2-9** SFR-1 Fördjupad säkerhetsanalys  
SKB Arbetsrapport SFR 91-10, SKB, Stockholm.  
Augusti 1991
- 2-10 Vieno T, Nordman H**  
Safety Analysis of the VLJ Repository.  
Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Report YJT-91-12  
(in Finnish).  
May 1991
- 2-11** Disposal of radioactive Waste: Review of safety Assessment methods,  
OECD/Nuclear Energy Agency; Paris.  
1991
- 2-12** Disposal of Radioactive Waste: Can Long-term Safety be Evaluated? An  
International Collective Opinion, OECD/NEA, Paris.  
1991
- 2-13 Andersson J (Editor)**  
The Joint SKI/SKB Scenario Development Project  
SKB Technical Report TR 89-35, Stockholm.  
December 1989
- 2-14 Ahlbom K, Ericsson och Äikäs T**  
SKB/TVO Ice Age Scenario.  
SKB Technical Report TR 91-32, Stockholm.  
1991
- 2-15** Projekt Alternativstudier för Slutförvar (PASS). Slutrapport.  
SKB, Stockholm.  
September 1992
- 2-16 Kjellbert N**  
Tullgarn – a near field radionuclide migration code.  
SKB Arbetsrapport AR 91-25, Stockholm.  
August 1991
- 2-17 Norman S, Kjellbert N**  
NEAR21 – A near field radionuclide migration code for use with the PROPER  
package.  
SKB Technical Report TR 91-19, Stockholm.  
April 1991
- 2-18 Nilsson L, Moreno L, Neretnieks N, Romero L**  
A resistance network model for radionuclide transport into the near field  
surrounding a repository for nuclear waste (SKB, Near Field Model 91).  
SKB Technical Report TR 91-30, Stockholm.  
June 1991
- 2-19 Edwards A L**  
TRUMP: A Computer Program for Transient and Steady State Temperature  
Distributions in Multidimensional Systems.  
report, Natl. Tech. Inf. Serv., Nat. Bur. of Standards, Springfield, VA.  
1969

- 2-20 Bengtsson A, Widén H**  
Transient release through the bentonite barrier – SKB 91.  
SKB Technical Report TR 91-33, Stockholm.  
May 1991
- 2-21 Romero L, Moreno L, Neretnieks I**  
A compartment model for solute transport in the near field of a repository for radioactive waste (Calculations for Pu-239).  
SKB Technical Report TR 91-48, Stockholm.  
October 1991
- 2-22 Nyman C, Ozolins V, Moreno L, Neretnieks I**  
Development of a model for handling the movement of redox fronts and other sharp reaction fronts.  
Paper presented at Migration 91.
- 2-23 Wolery T J**  
Calculation of Chemical Equilibrium between Aqueous Solutions and Minerals: The EQ3/6 Software Package.  
Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore CA, UCRL-52658.  
1979
- 2-24 Bruno J, Sellin P**  
Radionuclide solubilities to be used in SKB 91.  
SKB Technical Report TR 92-13, Stockholm.  
1992 (in print)
- 2-25 Puigdomènech I, Bruno J**  
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.  
October 1988
- 2-26 Puigdomènech I, Bruno J**  
Plutonium solubilities.  
SKB Technical Report TR 91-04, Stockholm.  
February 1991
- 2-27 Norman S**  
HYDRASTAR – A code for stochastic simulation of groundwater flow.  
SKB Technical Report TR 92-12, Stockholm.  
May 1992 (in print)
- 2-28 Lindbom B, Boghammar A**  
Numerical groundwater flow calculations at the Finnsjön study site – extended regional area.  
SKB Technical Report TR 92-03, Stockholm.  
March 1992

- 2-29 Ahlbom K (Part A), Svensson U (Part B and C)**  
 The groundwater circulation in the Finnsjö area – The impact of density gradients  
 Part A: Saline groundwater at the Finnsjö site and its surroundings  
 Part B: A numerical study of the combined effects of salinity gradients, temperature gradients and fracture zones  
 Part C: A three-dimensional numerical model of groundwater flow and salinity distribution in the Finnsjö area  
 SKB Technical Report TR 91-57, Stockholm.  
 November 1991
- 2-30 Dershowitz WS, Lee G, Geier J**  
 FRACMAN version 2.3. Interactive discrete feature data analysis, geometric modeling, and exploration simulation user documentation.  
 Golder Associate Inc., Redmond, Washington, USA.  
 1990
- 2-31 Miller I**  
 MAFIC version beta 1.2 – Matrix/fracture interaction code with absolute transport user documentation.  
 Golder Associates Inc., Redmond Washington, USA.  
 1990
- 2-32 Moreno L, Neretnieks I**  
 Fluid and solute transport in a network of channels.  
 SKB Technical Report TR 91-44, Stockholm.  
 September 1991
- 2-33 Bergström U, Nordlinder B**  
 Individual doses from radionuclides released to the Baltic coast.  
 SKB Technical Report TR 91-41, Stockholm.  
 May 1991
- 2-34 Zeevaert T and Jones C**  
 Transfer from the geosphere to the biosphere through two different receptor types.  
 Proc from "The validity of environmental transfer models BIOMOVs" October 8-10, 1990.  
 Swedish Radiation Protection Institute, Stockholm, Sweden.
- 2-35 Nordlinder S and Bergström U**  
 A dynamic model of the Cs-137 concentration in fish applied to seven different lake ecosystems – a VAMP scenario.  
 Presented at the 6th Nordic Radioecological seminar, Torshavn Faroe Islands 14-18 June 1992.  
 Studsvik report NS-92/44.
- 2-36 NEA PSAC User Group**  
 PSACOIN level 1b Intercomparison.  
 NEA/OECD, Paris.  
 1992
- 2-37 Bergström U, Nordlinder S**  
 Uncertainties related to dose assessments for high level waste disposal.  
 Nuclear safety vol 32 no 3.  
 1991



- 2-38 Bergström U, Evans S, Puigdoménech I, Sundblad B**  
 Long-term dynamics of a lake ecosystem and the implications for radiation exposure.  
 SKB Technical Report TR 88-31, Stockholm.  
 September 1988
- 2-39 Norman S**  
 Statistical inference and comparison of stochastic models for the hydraulic conductivity at the Finnsjö site.  
 SKB Technical Report TR 92-08, Stockholm.  
 April 1992
- 2-40 Kung Chen Shan, Wen Xian Huan, Cvetkovic V, Winberg A**  
 Stochastic continuum simulation of mass arrival using a synthetic data set. The effect of hard and soft conditioning.  
 SKB Technical Report TR 92-18, Stockholm.  
 June 1992
- 2-41 Geier J E, Axelsson C-L, Hässler L, Benabderrahmane A**  
 Discrete fracture modelling of the Finnsjön rock mass: Phase 2.  
 SKB Technical Report TR 92-07, Stockholm.  
 April 1992

### ***Kapitel 3***

- 3-1 Johnson L H and Shoesmith D W**  
 Spent Fuel.  
 In: Radioactive Waste Forms for the Future, Eds.: W Lutze and R C Ewing,  
 North-Holland Publ. Co. Amsterdam.  
 1988
- 3-2 Forsyth R S and Werme L O**  
 Spent fuel corrosion and dissolution.  
 J. Nucl. Mater., in print.  
 1992
- 3-3 Wilson C N**  
 Results from NNWSI series 2 bare fuel dissolution tests.  
 Pacific Northwest Laboratory Report PNL-7169, Richland WA.  
 September 1990
- 3-4 Wilson C N**  
 Results from NNWSI series 3 spent fuel dissolution tests.  
 Pacific Northwest Laboratory Report PNL-7170, Richland WA.  
 June 1990
- 3-5 Forsyth R S, Mattsson O and Schrire D**  
 Fissionproduct concentration profiles (Sr, Xe, Cs and Nd) at the individual grain level in power-ramped LWR fuel.  
 SKB Technical Report TR 88-24, Stockholm.  
 March 1990
- 3-6 Forsyth R S, Werme L O and Bruno J**  
 Preliminary study of spent UO<sub>2</sub> fuel corrosion in the presence of bentonite.  
 J. Nucl. Mater. vol.160, p. 218.  
 1988

- 3-7 Albinsson Y, Forsyth R S, Skarnemark G, Skålberg M Torstenfelt B and Werme L**  
Leaching/migration of UO<sub>2</sub> fuel in compacted bentonite.  
Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 176, p. 559.  
1990
- 3-8 Werme L, Sellin P and Forsyth R**  
Radiolytically induced oxidative dissolution of spent nuclear fuel.  
SKB Technical Report TR 90-08, Stockholm.  
May 1990
- 3-9 Shoesmith D W and Sunder S**  
An electrochemistry-based model for the dissolution of UO<sub>2</sub>.  
SKB Technical Report TR 91-63, Stockholm.  
December 1991
- 3-10 Finch R J and Ewing R C**  
Alteration of natural UO<sub>2</sub> under oxidizing conditions from Shinkolobwe, Katananga, Zaire: A natural analogue for the corrosion of spent fuel.  
Radiochimica Acta vol. 52/53, p. 395.  
1991
- 3-11 Finch R J and Ewing R C**  
Phase relations of the uranyl oxide hydrates and their relevance to the disposal of spent fuel.  
Mat. Res. Soc. Symp. Proc. vol. 212, p. 241.  
1991
- 3-12 Finch R J and Ewing R C**  
Alteration of natural uranyl oxide hydrates in Si-rich groundwaters: Implications for uranium solubility.  
Scientific Basis of Nuclear Waste Management XV, Materials Research Society, Pittsburg (in print).  
1992

## ***Kapitel 4***

- 4-1 The Swedish Corrosion Institute and its reference group**  
Copper as canister material for unprocessed nuclear waste – evaluation with respect to corrosion.  
KBS Technical Report 90, Stockholm.  
March 1978
- 4-2 The Swedish Corrosion Institute and its reference group**  
Corrosion resistance of a copper canister for spent nuclear fuel.  
SKBF/KBS Technical Report TR 83-24, Stockholm.  
April 1983
- 4-3 Werme L O, Sellin P and Kjellbert N**  
Copper canisters for nuclear high level waste disposal: Corrosion aspects.  
SKB Technical Report (in print).  
1992

- 4-4 Fett T, Keller K and Munz D**  
 Determination of crack growth parameters of alumina in 4-point bending tests.  
 Nagra Technical Report 85-51, Baden, Switzerland.  
 September 1985
- 4-5 Fett T, Hartlieb W, Keller K and Munz D**  
 Subcritical crack growth in high-grade alumina for container applications.  
 Nagra Technical Report 87-09, Baden, Switzerland.  
 September 1987
- 4-6 Johnson L H, Shoemith D W, Ikeda B M and King F**  
 Lifetimes of titanium and copper containers for the disposal of used fuel.  
 Scientific Basis of Nuclear Waste Management XV, Materials Research  
 Society, Pittsburg (in print).
- 4-7 Brookins D G**  
 Eh-pH-Digrams for Geochemistry  
 Springer-Verlag.  
 1988
- 4-8 Grauer R**  
 The reducibility of sulphuric acid and sulphate in aqueous solution (translated  
 from German).  
 SKB Technical Report TR 91-39, Stockholm.  
 July 1991
- 4-9 Taxén C**  
 Pitting corrosion under mildly oxidizing conditions.  
 SKB Arbetsrapport AR 92-43, Stockholm.  
 March 1992
- 4-10 Nilsson F (compiled by)**  
 Mechanical integrity of canisters.  
 SKB Technical Report (in print).  
 1992
- 4-11 Henderson P J, Österberg J-O and Ivarsson B**  
 Low temperature creep of copper intended for nuclear waste containers.  
 SKB Technical Report 92-04, Stockholm.  
 March 1992
- 4-12** Se 2-15.

## ***Kapitel 5***

- 5-1 Pusch R, Karnland O, Hökmark H, Sandén T, Börgesson L**  
 Final Report of the Rock Sealing Project – Sealing Properties and Longevity of  
 Smectite Clay Grouts.  
 Stripa Project Technical Report 91-30, SKB, Stockholm.  
 December 1991
- 5-2 Börgesson L**  
 Interim report on the laboratory and theoretical work in modeling the drained  
 and undrained behavior of buffer materials.  
 SKB Technical Report TR 90-45, Stockholm.  
 December 1990

- 5-3 Pusch R, Karnland O, Hökmark H**  
 GMM – A general microstructural model for qualitative and quantitative studies of smectite clays.  
 SKB Technical Report TR 90-43, Stockholm.  
 December 1990
- 5-4 Karnland O, Pusch R**  
 Development of clay characterization methods for use in repository design with application to a natural Ca bentonite clay containing a redox front.  
 SKB Technical Report TR 90-42, Stockholm  
 December 1990

## ***Kapitel 6***

- 6-1 AGU, American Geophysical Union.**  
 U.S. National Report to International Union of Geodesy and Geophysics, 1987-1990. Contributions in Hydrology. Twentieth General Assembly, IUGG, Vienna, Austria August 11-24.  
 1991
- 6-2 Palmqvist K**  
 Groundwater in crystalline bedrock.  
 SKB Technical Report TR 90-41, Stockholm.  
 1990
- 6-3 Larsson E**  
 Two phase flow in the disturbed zone around a drift in rock.  
 SKB Arbetsrapport (in print), Stockholm.  
 1992
- 6-4 Pusch R**  
 Alteration of the hydraulic conductivity of rock by tunnel excavation.  
 Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 26, No.1, pp. 71-83.  
 Pergamon Press, New York.  
 1989
- 6-5 Eliasson T**  
 Red coloration of wall rock adjacent to fractures.  
 SKB Arbetsrapport (in print), Stockholm.  
 1992
- 6-6 Rehbinder G**  
 Thermally induced flow of two immiscible stratified liquids in a porous body at a low Rayleigh number.  
 Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 13, No.2, June 1992. Butterworth Heinemann.  
 1992
- 6-7 Nyberg G & Voss C**  
 Problems in modelling groundwater systems in limited scale.  
 SKB Arbetsrapport AR 91-10, Stockholm.  
 1991
- 6-8 Ahlbom K, Äikäs T, Ericsson L O**  
 SKB/TVO Ice age scenario.  
 SKB Technical Report TR 91-32, Stockholm.  
 1991

- 6-9 Vallander P, Eurenus J**  
Impact of a repository on permafrost development during glaciation advance.  
SKB Technical Report TR 91-53, Stockholm.  
1991
- 6-10 Lindbom B, Boghammar A**  
Exploratory calculations concerning the influence of glaciation and permafrost  
on the groundwater flow system, and initial study of permafrost influences at  
the Finnsjön site – a SKB 91 study.  
SKB Technical Report TR 91-58, Stockholm.  
1991
- 6-11 Boulton G S**  
Proposed approach to time-dependent or "event-scenario" modelling of future  
glaciation in Sweden.  
SKB, Arbetsrapport AR 91-27, Stockholm.  
1991
- 6-12 Rosén L, Gustafson G**  
A strategy for geoscientific classification for high-level waste repository loca-  
lization.  
SKB Technical Report (in print), Stockholm.  
1992
- 6-13 SKB Annual Report, 1990.**  
SKB Technical Report TR 90-46, Stockholm.  
1990
- 6-14 SKB Annual Report, 1991.**  
SKB Technical Report TR 91-64, Stockholm.  
1991
- 6-15 de Marsily G**  
Quantitative Hydrogeology, Groundwater Hydrology for Engineers.  
Academic Press, Inc., Orlando, USA.  
1986
- 6-16 Neretnieks I**  
Solute transport in fractured rock - Applications to radionuclide waste reposi-  
tories.  
SKB Technical Report TR 90-38, Stockholm.  
1990
- 6-17 Se 1-7.**
- 6-18 Gustafson G**  
Äspö Hard Rock Laboratory. Modelling of the groundwater flow and transport  
of solutes during the construction phase.  
SKB Technical Document TD 25-91-008, Stockholm.  
1991
- 6-19 Axelsson C, et al.**  
Discrete fracture modelling.  
SKB, Äspö HRL Progress Report PR 25-89-21, Stockholm.  
1990

- 6-20 Kung Chen Shan et al.**  
Stochastic continuum simulation of mass arrival using a synthetic data set. The effect of hard and soft conditioning.  
SKB Technical Report TR 92-18, Stockholm.  
1992
- 6-21 Ericsson L O**  
Fractal dimension for fracture generations with the Levy-Lee clustering modell, conceptual modelling of Äspö.  
SKB, Äspö HRL Progress Report PR 25-90-16a (ed. M. Liedholm), Stockholm.  
1991
- 6-22 Dershowitz W et al.**  
The implication of fractal dimension in hydrology and rock mechanics.  
SKB Technical Report TR 92-17, Stockholm.  
1992
- 6-23 Bergman M et al.**  
Utnyttjande av numeriska beräkningsmodeller för geoteknisk projektering av anläggningar i berg.  
BeFo, Arbetsrapport från projekt 132, Stockholm.  
1988
- 6-24 Tsang C F (Editor).**  
Coupled processes associated with a nuclear waste repository.  
Academic Press, San Diego, CA, USA.  
1987
- 6-25 Tsang C F**  
Coupled behaviour of joints.  
Proceedings of ISRM Conference, Loen, Norway. Balkema.  
1990
- 6-26 Rehbinder G**  
2D & 3D simplified analysis founded upon the continuum approach and radial symmetry.  
SKB Arbetsrapport (in print), Stockholm.  
1992
- 6-27 SKI, Decovalex**  
Decovalex. International co-operative project for the development of coupled models and their validation against experiments in nuclear waste isolation, Project Plan.  
SKI, Progress Report, Stockholm.  
1991
- 6-28 Larsson S-Å, Tullborg E-L**  
Tectonics and paleostress regimes in the southern part of the Baltic Shield during the last 1200 Ma – a review.  
SKB Technical Report (in print), Stockholm.  
1992
- 6-29 Andreasson P-G, Rodhe A**  
The Protogine Zone Geology and Mobility during the last 1.5 Ga.  
SKB Technical Report (in print), Stockholm.  
1992

- 6-30 Wannäs K O, Flodén T**  
Tectonic framework of the Hanö Bay area, Southern Baltic Area.  
SKB Technical Report (in print), Stockholm.  
1992
- 6-31 Milnes A G, Gee D G**  
Bedrock stability in the southeastern Sweden – evidence from fracturing in the Ordovician limestones of northern Öland.  
SKB Technical Report (in print), Stockholm.  
1992
- 6-32 Eronen M, Olander H**  
On the world's ice ages and changing environments.  
TVO Report YJT-90-13, Helsinki, Finland.  
1990
- 6-33 Björk S, Svensson N-O**  
Climatic change and uplift patterns-past, present and future.  
SKB Technical Report (in print), Stockholm.  
1992
- 6-34 Kuhla G**  
Probability of expected climatic stresses in North America in the next one M.Y.  
In Scott, Craig, Benson and Harwell (eds), A summary of FY-1978 consultant input for scenario methodology development. Pacific Northwest Laboratory of Batelle Memorial Inst, PNL-2851.  
1979
- 6-35 Imbrie J, Imbrie J Z**  
Modelling the climatic response to orbital variations.  
Science, Vol. 207, pp. 943-953.  
1980
- 6-36 Boulton G S, Payne A**  
Simulation of past and prediction of future glaciation in Europe.  
SKB Technical Report (in print), Stockholm.  
1992
- 6-37 Rosengren L, Stephansson O**  
Distinct element modelling of the rock mass response to glaciation at Finnsjön, central Sweden.  
SKB Technical Report TR 90-40, Stockholm.  
1990
- 6-38 Israelsson J, Rosengren L, Stephansson O**  
Sensitivity study of rock mass response to glaciation at Finnsjön, central Sweden.  
SKB Technical Report (in print), Stockholm.  
1992
- 6-39 Pässe T**  
Empirical estimation of isostatic uplift using the lake-tilting method at Lake Fegen and Lake Säven, southwestern Sweden.  
Mathematical Geology, Vol. 22, No. 7, 1990.  
1990

- 6-40 Bäckblom G, Stanfors R (Eds)**  
Interdisciplinary study of post-glacial faulting in the Lansjärv area, northern Sweden, 1986-1988.  
SKB Technical Report TR 89-31, Stockholm.  
1990
- 6-41 Lagerbäck R**  
Seismically deformed sediments in the Lansjärv area, northern Sweden.  
SKB Technical Report TR 91-17, Stockholm.  
1991
- 6-42 Stanfors R (Editor)**  
The Lansjärv excursion 1991 – Proceedings  
SKB Technical Report (in print), Stockholm.  
1992
- 6-43 Slunga R**  
The seismicity of southern Sweden, 1979-1984, final report.  
FOA Report C20578-T1, ISSN 0347-3694, Stockholm.  
1985
- 6-44 Slunga R, Nordgren**  
Earthquake measurements in southern Sweden Oct 1, 1986 –  
Mar 31, 1987.  
SKB Technical Report TR 87-27, Stockholm.  
1987
- 6-45 Slunga R**  
Earthquake mechanisms in northern Sweden Oct 1987 – Apr 1988.  
SKB Technical Report TR 89-28, Stockholm.  
1989
- 6-46 Muir-Wood R**  
A review of the seismotectonics of Sweden.  
SKB Technical Report (in print), Stockholm.  
1992
- 6-47 Sakellariou M, et al.**  
Technical note. On the fractal character of rock surfaces.  
Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech Abstr. Vol 28, No. 6, pp. 527-533.  
Pergamon Press.  
1991
- 6-48 Maddock R, et al.**  
Direct fault dating trials at the Äspö Hard Rock Laboratory.  
SKB Technical Report (in print), Stockholm.  
1992

## *Kapitel 7*

- 7-1 Laaksoharju M**  
Measured and predicted groundwater chemistry at Äspö.  
SKB Progress Report PR 25-90-13, Stockholm.  
1990



- 7-2 Laaksoharju M**  
Shallow groundwater chemistry at Laxemar, Äspö and Ävrö.  
SKB Progress Report PR 25-88-04, Stockholm.  
1988
- 7-3 Nilsson A-C**  
Chemical characterization of deep groundwater on Äspö.  
SKB Progress Report PR 25-89-14, Stockholm.  
1989
- 7-4 Wikberg P (Editor), Gustafson G, Rhen I, Stanfors R**  
Äspö Hard Rock Laboratory. Evaluation and conceptual modelling based on the  
pre-investigations 1986–1990.  
SKB Technical Report TR 91-22, Stockholm.  
1991
- 7-5 Wikberg P, Axelsen K, Fredlund F**  
Deep groundwater Chemistry.  
SKB Technical Report TR 87-07, Stockholm.  
1987
- 7-6 Grenthe I, Stumm W, Laaksoharju M, Nilsson A-C, Wikberg P**  
Redox potentials and redox reactions in deep groundwater systems.  
Chemical Geology 98(1992)p 131–150.  
1992
- 7-7 Pirhonen P, Pitkänen P**  
Redox capacity of crystalline rocks. Laboratory studies under 100 bar oxygen  
gas pressure.  
SKB Technical Report TR 91-55, Stockholm.  
1991
- 7-8 Landström O, Tullborg E-L**  
The influence of fracture mineral/groundwater interaction on the mobility of U,  
Th, REE and other trace elements.  
SKB Technical Report TR 90-37, Stockholm.  
1990
- 7-9 Tullborg E-L, Wallin B, Landström O**  
Hydrogeochemical studies of fracture minerals from water conducting fractures  
and deep groundwaters at Äspö.  
SKB Progress Report 25-90-01, Stockholm.  
1991
- 7-10 Possnert G, Tullborg E-L**  
Carbon-14 analyses of calcite coatings in open fractures from the Klipperås  
study site, southern Sweden.  
SKB Technical Report TR 89-36, Stockholm.  
1989
- 7-11 Possnert G, Tullborg E-L**  
Carbon-14 analyses of calcite coatings in open fractures from borehole KAS05  
at Äspö.  
SKB Progress Report 92-XX (in print).

- 7-12 Wallin B**  
Sulphur and oxygen isotope evidence from dissolved sulphates in groundwater and sulphide sulphur in fissure fillings at Äspö, southeastern Sweden.  
SKB Progress Report PR 25-92-08, Stockholm.  
1992
- 7-13 Nebot J, Bruno J**  
The implications of soil acidification on a future high level waste repository. Part I: The effect of increased weathering, erosion and deforestation  
SKB Technical Report TR 91-45, Stockholm.  
1991
- 7-14 Smellie J, Laaksoharju M**  
The Äspö Hard Rock Laboratory.  
Final evaluation of the hydrogeochemical pre-investigation in relation to existing geologic and hydraulic conditions.  
SKB Technical Report TR 92-XX (in print).  
1992
- 7-15 Bruno J, Sandino A**  
The solubility of amorphous and crystalline schoepite in neutral to alkaline solutions.  
Materials Research Society Symposium Proceedings Vol 127 (1989) p 871.  
1989
- 7-16 Bruno J, Sandino A, Fredlund F**  
The solubility of  $(\text{UO}_2)_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}(\text{s})$  in neutral and alkaline media.  
Migration-89 Symposium in Monterey, California, November 6-10.  
1989
- 7-17 Bruno J, Grenthe I, Lagerman B**  
On the  $\text{UO}_2^{2+}/\text{U}^{4+}$  redox potential.  
Acta Chemica Scandinavica 44 (1990) p 896-901.  
1990
- 7-18 Grenthe I, Lagerman B**  
Studies on metal carbonate equilibria 22. A coulometric study of the uranium (VI)-carbonate system, the composition of the mixed hydroxide carbonate species.  
Acta Chemica Scandinavica 45 (1991) p 122-128.  
1991
- 7-19 Grenthe I, Lagerman B**  
Studies on metal carbonate equilibria 12. Complex formation in the Th(IV)- $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2(\text{g})$  system. Acta Chemica Scandinavica 45 (1991), p 231-238.  
1991
- 7-20 Lagerman B**  
Complex formation in the actinoid- $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2(\text{g})$  system. PhD thesis at Royal Institute of Technology, Stockholm, TRITA-OOK-1029.  
1990
- 7-21 Bidogli G, Cavalli P, Grenthe I, Omenetto N, Pan Qi, Tanet G**  
Studies on metal carbonate equilibria 21. Studies of the U(VI)- $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2(\text{g})$  system by thermal lensing spectrophotometry.  
Talanta 1991 38(1991) p 433-437.  
1991

- 7-22 **Engkvist I, Albinsson Y**  
Hydrolysis studies of thorium using solvent extraction technique.  
Radiochemica Acta (1992) (submitted).  
1991
- 7-23 **Puigdomènech I, Bruno J**  
Plutonium solubilities.  
SKB Technical Report TR 91-04, Stockholm.  
1991
- 7-24 **Eriksen T, Ndalamba P, Bruno J, Caceci M**  
The solubility of  $TcO_2 \cdot nH_2O$  in neutral to alkaline solutions under constant  $pCO_2$ . Radiochemica Acta (1991) (submitted).  
1991
- 7-25 **Bruno J, Charlet L, Karthein R, Sandino A and Wersin P**  
Adsorption, precipitation and co-precipitation of trace metals on carbonate minerals at low temperatures. Water Rock Interaction Symposium, WRI/-6. Ed. by Miles D L and Balkema, Rotterdam, Brookfield.  
1989
- 7-26 **Eriksen T, Daqing C**  
On the interaction of granite with Tc(IV) and Tc(VII) in aqueous solution.  
SKB Technical Report TR 91-47, Stockholm.  
1991
- 7-27 **Byegård J, Albinsson Y, Skarnemark G, Skålberg M**  
Field and laboratory studies of the reduction and sorption of technetium (VII).  
Radiochemica Acta (1992) (submitted).  
1991
- 7-28 **Pettersson J E, Ephraim J, Allard B, Borén H**  
Characterization of humic substances from deep groundwaters in granitic bedrock in Sweden.  
SKB Technical Report TR 90-29, Stockholm  
1990
- 7-29 **Pettersson C, Arsenie I, Ephraim J, Borén H, Allard B**  
Properties of fulvic acids from deep groundwaters. Sci. Tot. Environ. Vol 81/82 (1989) p 287-296.  
1989
- 7-30 **Allard B, Arsenie I, Borén H, Ephraim J H, Gårdhammar G, Pettersson C**  
Isolation and characterization of humics from natural waters.  
SKB Technical Report TR 90-27, Stockholm.  
1990
- 7-31 **Ephraim J, Borén H, Pettersson C, Arsenie I, Allard B**  
A novel description of the acid-base properties of an aqueous fulvic acid. Environmental Science and Technology Vol 23 (1989) p 356-362.  
1989
- 7-32 **Ephraim J H, Mathuthu A S, Marinsky J A**  
Complex forming properties of natural organic acids. Part 2. Complexes with iron and calcium.  
SKB Technical Report TR 90-28, Stockholm.  
1990

- 7-33 Bidoglio G, Grenthe I, Pan Qi, Robuch P, Omenetto N**  
Complexation of Eu and Tb with fulvic acids as studied by fine resolved laser induced fluorescence. *Talanta* 1991 38(1991), p 999-1008.  
1991
- 7-34 Sätmark B, Albinsson Y**  
Sorption of fission products on natural occurring mineral colloids and their stability. *Radiochemica Acta* (1992) (submitted).  
1991
- 7-35 Ledin A, Karlsson S, Allard B**  
Effects of pH, ionic strength and organic macromolecules on size distribution and surface charge of colloidal quartz and hematite. *Journal of Applied Geochemistry* (1992) (submitted).  
1992
- 7-36 Pedersen K**  
Deep groundwater microbiology in Swedish granitic rock and its relevance for radionuclide migration from a Swedish high level nuclear waste repository. SKB Technical Report TR 89-23, Stockholm.  
1989
- 7-37 Pedersen K**  
Potential effects of bacteria on radionuclide transport from a Swedish high level nuclear waste repository.  
SKB Technical Report TR 90-05, Stockholm.  
1991
- 7-38 Pedersen, K, Ekendahl S, Arlinger J**  
Microbes in crystalline bedrock. Assimilation of CO<sub>2</sub> and introduced organic compounds by bacterial populations in groundwater from deep crystalline bedrock at Laxemar and Stripa.  
SKB Technical Report TR 91-56, SKB, Stockholm.  
1991
- 7-39 Pedersen K, Albinsson Y**  
Possible effects of bacteria on trace element migration in crystalline bedrock. *Radiochemica Acta* 54 (1992) s 91-95.  
1991
- 7-40 Pedersen K, Albinsson Y**  
The effect from the number of cells, pH and lanthanide concentration on the sorption of promethium on gramnegative bacterium.  
SKB Technical Report TR 90-26, Stockholm.  
1990
- 7-41 Allard B, Karlsson F, Neretnieks I**  
Concentrations of particulate matter and humic substances in deep groundwater and estimated effects on the adsorption and transport of radionuclides.  
SKB Technical Report 90-50, Stockholm.  
1991
- 7-42 Eriksen T and Locklund B**  
Radionuclide sorption on crushed and intact granitic rock. Volume and surface effects.  
SKB Technical Report TR 89-25, Stockholm.  
1989

- 7-43 Albinsson Y**  
Sorption of radionuclides in granitic rock.  
SKB Report AR 91-07, Stockholm.  
1991
- 7-44 Rundberg R S, Albinsson Y**  
Carbonate adsorption on goethite as a function of pH and ionic strength.  
Radiochemica Acta (1992) (submitted).  
1992
- 7-45 Rundberg R S, Albinsson Y**  
Neptunium adsorption on goethite and hematite as a function of pH.  
Radiochemica Acta (1992) (submitted).  
1992
- 7-46 Albinsson Y and Engkvist I**  
Diffusion of Am, Pu, U, Np, Cs, I and Tc in compacted sand-bentonite mixture.  
SKB Technical Report TR 89-22, Stockholm.  
1989
- 7-47 Brandberg F, Skagius K**  
Porosity, sorption and diffusivity data compiled for the SKB 91 study.  
SKB Technical Report TR 91-16, Stockholm.  
1991
- 7-48 Albinsson Y, Sätmark B**  
Transport of actinides and Tc through a bentonite backfill containing small quantities of iron, copper or minerals in inert atmosphere.  
SKB Technical Report TR 90-06, Stockholm.  
1990
- 7-49 Andersson K, Allard B, Bengtsson M, Magnusson B**  
Chemical composition of cement pore solutions. Cement Concrete Research Vol 19 (1989) p 327-332.  
1989
- 7-50 Wiborgh M, Markström A**  
Compilation of potential chemical toxic elements in a copper canister containing HLW.  
SKB Arbetsrapport AR 91-31, Stockholm.  
1991
- 7-51** Se 1-14.

## ***Kapitel 8***

- 8-1 Schorscher H D, Shea M E**  
The regional geology, mineralogy and geochemistry of the Poços de Caldas alkaline caldera complex, Minas Gerais, Brazil.  
SKB Technical Report TR 90-10, Stockholm.  
1990
- 8-2 Waber N, Schorscher H D, Peters T**  
Mineralogy, petrology and geochemistry of the Poços de Caldas analogue study sites, Minas Gerais, Brazil. I: Osamu Utsumi uranium mine.  
SKB Technical Report TR 90-11, Stockholm.  
1990

- 8-3 Waber N**  
Mineralogy, petrology and geochemistry of the Poços de Caldas analogue study sites, Minas Gerais, Brazil. II: Morro do Ferro.  
SKB Technical Report TR 90-12, Stockholm.  
1990
- 8-4 Shea M E**  
Isotopic geochemical characterisation of selected nepheline syenites and phonolites from the Poços de Caldas alkaline complex, Minas Gerais, Brazil.  
SKB Technical Report TR 90-13, Stockholm.  
1990
- 8-5 Holmes D C, Pitty A E, Noy R**  
Geomorphological and hydrogeological features of the Poços de Caldas caldera and the Osamu Utsumi mine and Morro do Ferro analogue study sites, Brazil.  
SKB Technical Report TR 90-14, Stockholm.  
1990
- 8-6 Nordstrom D K, Smellie J A T, Wolf M**  
Chemical and isotopic composition of groundwaters and their seasonal variability at the Osamu Utsumi and Morro do Ferro analogue study sites, Poços de Caldas, Brazil.  
SKB Technical Report TR 90-15, Stockholm.  
1990
- 8-7 MacKenzie A B, Linsalata P, Miekeley N, Osmond J K, Curtis D B**  
Natural radionuclide and stable element studies of rock samples from the Osamu Utsumi mine and Morro do Ferro analogue study sites, Poços de Caldas, Brazil.  
SKB Technical Report TR 90-16, Stockholm.  
1990
- 8-8 Miekeley N, Coutinho de Jesus O, Porto da Silveira C-L, Linsalata P, Andrews J N, Osmond J K**  
Natural series nuclide and rare earth element geochemistry of waters from the Osamu Utsumi mine and Morro do Ferro analogue study sites. Poços de Caldas, Brazil.  
SKB Technical Report TR 90-17, Stockholm.  
1990
- 8-9 Miekeley N, Couthino de Jesus O, Porto da Silveira C-L, Degueldre C**  
Chemical and physical characterisation of suspended particles and colloids in waters from the Osamu Utsumi mine and Morro do Ferro analogue study sites, Poços de Caldas, Brazil.  
SKB Technical Report TR 90-18, Stockholm.  
1990
- 8-10 West J, Vialta A, McKinley I G**  
Microbiological analysis at the Osamu Utsumi mine and Morro do Ferro analogue study sites, Poços de Caldas, Brazil.  
SKB Technical Report TR 90-19, Stockholm.  
1990
- 8-11 Bruno J, Cross J E, Eikenberg J, McKinley I G, Read D, Sandino A, Sellin P**  
Testing of geochemical models in the Poços de Caldas analogue study.  
SKB Technical Report TR 90-20, Stockholm.  
1990

- 8-12 Cross J, Haworth A, Lichtner P C, McKenzie A B, Moreno L, Neretnieks I, Nordstrom D K, Read D, Romero L, Sharland S M, Tweed C J**  
Testing models of redox front migration and geochemistry at the Osamu Utsumi mine and Morro do Ferro analogue sites, Poços de Caldas, Brazil.  
SKB Technical Report TR 90-21, Stockholm.  
1990
- 8-13 Cathles L M, Shea M E**  
Near-field high temperature transport: Evidence from the genesis of the Osamu Utsumi uranium mine analogue site, Poços de Caldas, Brazil.  
SKB Technical Report TR 90-22, Stockholm.  
1990
- 8-14 Nordstrom D L, Puigdomenech I, McNutt R H**  
Geochemical modelling of water-rock interactions at the Osamu Utsumi mine and Morro do Ferro analogue sites, Poços de Caldas, Brazil.  
SKB Technical Report TR 90-23, Stockholm.  
1990
- 8-15 Romero L, Moreno L, Neretnieks I**  
Modelling of the movement of the redox front in the uranium mine in Poços de Caldas, Brazil.  
SKB Technical Report TR 90-39, Stockholm.  
1990
- 8-16 Miekeley N, Kuchler I L**  
Interactions between thorium and humic compounds in surface waters. *Inorg. Chim. Acta*, 140, 315-319.  
1987
- 8-17 Miekeley N, Vale M G R, Porto da Silveira C L**  
Determination of isotopic and total uranium at ultra-trace level in water by alpha-spectroscopy and micro-injection ICP-AES. *Inorg. Chim. Acta*, 140, 321-325.  
1987
- 8-18 Zhu M**  
Simulation of redox front movement in the Poços de Caldas mine. In: Some aspects of modelling of the migration of chemical species in groundwater systems. Licentiate Thesis (January 1988). Royal Institute of Technology, Dept. Chem. Eng., Stockholm.  
1988
- 8-19 Miekeley N, Jesus H C, da Silveira C L P, Kuechler I L**  
Colloid Investigations in the Poços de Caldas Natural Analogue Project. Presented at the Twelfth International Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management (MRS). October 10-13, Berlin, p 831-842.  
1988
- 8-20 Smellie J A T, Chapman N A, McKinley I G, Penna Franca E, Shea M**  
Testing Safety Assessment Models Using Natural Analogues in High Natural-series Groundwaters; a Progress Report on the Second Year of the Poços de Caldas Project. Presented at the Twelfth International Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management. (MRS) October 10-13, Berlin, p 863-870.  
1988

- 8-21 West J M, Vialta A, McKinley I G**  
The Influence of Microbial Activity on the Movement of Uranium at the Osamu Utsumi Mine, Poços de Caldas, Brazil. Presented at the Twelfth International Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management. (MRS) October 10-13, Berlin, p 771-777.  
1988
- 8-22 Coutinho de Jesus**  
Desequilibrios radioactivos em aguas e rochas e outros aspectos geoquimicos da mina de uranio "Osamu Utsumi" e do deposito torifero "Morro do Ferro", Poços de Caldas, M.G.M.Sc. Thesis. Pontifical Universidade Catholica do Rio de Janeiro (PUC).  
1989
- 8-23 Cross J, Haworth A, Neretnieks I, Sharland S M, Tweed C J**  
Modelling of redox front movement in a uranium mine at Poços de Caldas. Presented at the Migration 89 Symposium in Monterey, California, November 6-10.  
1989
- 8-24 Nyman C, Ozolins V, Moreno L, Neretnieks I**  
Development of a model for handling the movement of redox fronts and other sharp reaction fronts. In the Fifteenth International Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management (MRS), November 4-8, Strasbourg.  
1991
- 8-25 Waber N**  
Behaviour of thorium and light rare earth elements during lateritic weathering of the Th-REE deposit at Morro do Ferro, Poços de Caldas, Brazil. In Chemistry and Migration Behaviour of Actinides and Fission Products in the Geosphere, Jerez de La Frontera, 21-25 October.  
1991
- 8-26 Romero L, Neretnieks I, Moreno L**  
Movement of the redox front at a uranium mine at Poços de Caldas. In the Fifteenth International Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management (MRS).  
November 4-8, Strasbourg.  
1991
- 8-27 Cross J E, Gabriel D S, Haworth, Neretnieks I, Sharland S M, Tweed C J**  
Modelling of redox front and uranium movement in a uranium mine at Poços de Caldas, Brazil. Harwell Report NSS/R252, AEA D&R 0081, Oxon, Didcot, UK.  
1991
- 8-28 Chapman N A, McKinley I G, Shea M E, Smellie J A T**  
The Poços de Caldas Project: Summary and implications for radioactive waste management.  
SKB Technical Report TR 90-24, Stockholm.  
1990
- 8-29 Lichtner P**  
The quasi-stationary state approximation to coupled mass transport and fluid rock interactions in a porous medium. *Geochimica Cosmochimica Acta* 52 (1988), p 143-165.  
1988



- 8-30** Cigar Lake Project, Annual Report of the AECL/SKB Cigar Lake Project. Phase 1: 1989-1990, AECL, Pinawa.  
1990
- 8-31** Cigar Lake Project, Second Annual Report of the AECL/SKB Cigar Lake Project. Year 2, 1990-1991, AECL, Pinawa.  
1991
- 8-32 Naudet R**  
Oklo: Des reacteurs nucléaires fossiles. Eyrolles, Paris.  
1991
- 8-33 Tweed D J, Linklater C M, Eikenberg J, Alexander W R, Dayal R, Eagleson K, Miledowski A E, Khoury H N**  
A natural analogue of high pH cement pore waters from the Maqarin area of northern Jordan: Comparison of predicted and observed trace element chemistry. In Migration 91, Third International Conference in Jerez de la Frontera, October 21-25.  
1991

## *Kapitel 9*

- 9-1** FoU-program 89. Kärnkraftavfallets behandling och slutförvaring. Program för forskning, utveckling och övriga åtgärder. Del II.  
SKB, Stockholm.  
September 1989
- 9-2 Almén, K-E, Zellman, O**  
Äspö Hard Rock Laboratory. Field Investigation Methodology and Instruments used in the Preinvestigation phase, 1986–1990.  
SKB Technical Report TR 91-21, Stockholm.  
1991
- 9-3** Se 1-14.
- 9-4 Ljunggren C, Norman R**  
Kärnborrning med omvänd spolning. Etapp 2B. Fullskaleförsök.  
SKB Arbetsrapport AR 92-44, Stockholm.  
1992
- 9-5 Falk L**  
Directional Borehole Antenna – Theory.  
Stripa Project Technical Report 92-16, SKB, Stockholm.  
1992
- 9-6 Cosma C, Heikkinen P, Pekonen S**  
Improvement of High Resolution Borehole Seismics. Part I, Development of Processing Methods for VSP Surveys. Part II, Piezoelectric Signal Transmitter for Seismic Measurements.  
Stripa Project Technical Report 91-13, SKB, Stockholm.  
1991
- 9-7 Heikkinen E, Salesa P, Hinkkanen H (Editors)**  
1991  
Geophysical Investigations in the Veitsivaara Area, Finland. Summary Report. YJT-91-20. Finland.  
1991

- 9-8 Wikberg P, Gustafsson G, Rhén I, Stanfors R**  
 Äspö Hard Rock Laboratory. Evaluation and Conceptual Modelling Based on the Pre-investigations 1986–1990  
 SKB Technical Report TR 91-22, Stockholm.  
 1991
- 9-9 Svensson U, Andersson J-E, Andersson P, Eriksson K-O, Gustafsson E, Ittner T, Nordqvist R, Rhén I**  
 Long-Term Pumping and Tracer Test (LPT-2) in Boreholes KAS06. Numerical Prediction, Evaluation and Validation of Groundwater Flow and Transport.  
 SKB Technical Report (in print).  
 1992
- 9-10 Gustafsson E, Andersson P, Nordqvist R**  
 Radially Converging Tracer Experiment in a Low Angle Fracture Zone at the Finnsjö Site, Central Sweden. The Fracture Zone Project, Phase 3.  
 SKB Technical Report (in print).  
 1992
- 9-11 Birgersson L, Ågren T**  
 Site Characterization and Validation Drift, Report 1: Instrumentation, Site Preparation and Tracers.  
 Stripa Project Technical Report 92-02, SKB, Stockholm.  
 January 1992
- 9-12 Andersson P, Andersson P, Gustafsson E, Olsson O**  
 Investigation of Flow Distribution in a Fracture Zone at the Stripa Mine, Using the Radar Methods. Results and Interpretation.  
 SKB Technical Report TR 89-33, Stockholm.  
 1989
- 9-13 Christiansson R, Stenberg L**  
 Manual for the Field Work in the Tunnel. Documentation of the Geological, Hydrogeological and Groundwater Chemistry Conditions in the Access Tunnel.  
 SKB Progress Report PR 25-91-10, Stockholm.  
 1991
- 9-14 Stanfors R (Editor)**  
 Evaluation of Geological Predictions in the Access Ramp 0-0/700 meters.  
 SKB Progress Report PR 25-92-02, Stockholm.  
 1991
- 9-15 Almén K-E, Johansson B**  
 The Hydro Monitoring System (HMS) of the Äspö Hard Rock Laboratory.  
 SKB Progress Report PR 25-92-09, Stockholm (in print).  
 1992
- 9-16** Se 2-1.

## ***Kapitel 10***

- 10-1 Axelsson C-L, Byström J, Eriksson Å, Holmien J, Mjatema H M**  
 Hydraulic Evaluation of the ground water conditions at Finnsjön. The effects on dilution in a domestic well.  
 SKB Technical Report TR 91-54, Stockholm.  
 1991

- 10-2 Elert M, Argärde A-C**  
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, Sweden.  
1985
- 10-3 Elert M, Argärde A-C, Ericsson A-M**  
Modelling of the interface between the geosphere and the biosphere – Discharge through a soil layer.  
Kemakta AR 88-23. Swedish National Institute of Radiation Protection, Stockholm, Sweden.  
1988
- 10-4 Sundblad B, Puigdomenech I, Mathiasson**  
Interaction between geosphere and biosphere in lake sediments.  
SKB Technical Report TR 91-40, Stockholm.  
1992
- 10-5 Hoffman F O**  
Conclusions of BIOMOVS phase 1  
Proc from "The validity of environmental transfer models BIOMOVS", October 8-10, 1990, Swedish Radiation Protection Institute, Stockholm, Sweden.
- 10-6 Landström O, Sundblad B**  
Migration of Thorium, Uranium, Radium and <sup>137</sup>Cs in till soils and their uptake in organic matter and peat.  
SKB Technical Report TR 86-24, Stockholm.  
1986
- 10-7 Bernardt G P, Randall D B, Hess C T**  
137-Cs in wood ash within the state of Maine.  
Health Physics v 62 no 6.  
June 1992
- 10-8 Jantunen M J, Reponen A, Mustonen R, Itkonen A, Kauranen P**  
Behavior of Chernobyl fallout radionuclides in peat combustion.  
Health Phys.62(3):245-249.  
March 1992
- 10-9 Bergström U, Nordlinder S**  
Uncertainties Related to Dose Assessment for High Level Waste Disposal.  
Nuclear Safety Vol 32 No 3.  
July-September 1991
- 10-10 Dames and Moore**  
Report of a seminar on Natural environment change.  
UKDOE rep no DOE/RW/89.029.  
January 1989
- 10-11 Thorne M C**  
The biosphere; current status.  
Electrowatt engineering services (UK) LTD West Sussex HL89/1085.  
June 1988
- 10-12 Andersson J (Editor)**  
The joint SKI/SKB scenario development project.  
SKB Technical Report TR 89-35, Stockholm.  
1989

**10-13 Evans S**

Quantitative estimates of sedimentation rates and sediment growth in two Swedish lakes.

SKB Technical Report TR 86-29, Stockholm.

1986

**10-14 Sundblad B**

Recipient evolution – transport and distribution of elements in the lake Sibbo-Trobbofjärden area.

SKB Technical Report TR 86-30, Stockholm.

1986

**10-15 Andersson K**

Water composition in the lake Sibbofjärden, lake Trobbofjärden area.

SKB Technical Report TR 87-30, Stockholm.

1987

**10-16 Bergström U, Evans S, Puigdomenech I, Sundblad B**

Long-term dynamics of a lake ecosystem and the implications for radiation exposure.

SKB Technical Report TR 88-31, Stockholm.

September 1988

**10-17 Smith G**

Scenario B5; Ageing of a Lake.

BIOMOVS Technical Report 5 National Institute of Radiation Protection, Stockholm, Sweden.

May 1989

**10-18 Gustavsson E, Skålberg M, Sundblad B, Karlberg O, Tullborg E-L, Ittner T, Carbol P, Eriksson N, Lampe S**

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.

1987

**10-19 Carbol P, Ittner T, Skålberg M**

Radionuclide Deposition and Migration of the Chernobyl fallout in Sweden.

Radiochimica Acta 44/45,207-212.

1988

**10-20 Ittner T**

Long term sampling and measuring program. Joint report for 1987, 1988 and 1989. Within the project: Fallout studies in the Gideå and Finnsjö areas after the Chernobyl accident in 1986.

SKB Technical Report TR 91-09, Stockholm.

December 1990

**10-21 Ittner T**

Surface mapping of the Gideå area.

SKB Technical Report TR 91-29, Stockholm.

1991

- 10-22 Ittner T, Tammela P-T, Gustavsson E**  
Soil map, area and volume calculations in Orrmyrberget catchment basin at Gideå, Northern Sweden.  
SKB Technical Report TR 91-29, Stockholm.  
June 1991
- 10-23 Ittner T, Gustavsson E, Nordqvist R**  
Radionuclide content in surface and groundwater transformed into breakthrough curves. A Chernobyl fallout study in a forested area of northern Sweden.  
SKB Technical Report TR 91-28, Stockholm.  
1991
- 10-24 Nordqvist R, Gustavsson E, Ittner T**  
Transport of the Chernobyl fallout in soil and bedrock – A field study.  
Applied Geochemistry (in print).  
1991
- 10-25 Landström et al.**  
Migration experiments in Studsvik.  
SKBF/KBS Technical Report TR 83-18, Stockholm.  
January 1981
- 10-26 Abelin H, Neretniks I, Tunbrant S, Moreno L**  
Final report of the Migration in a single fracture – experimental results and evaluation.  
Stripa Project Technical Report 85-03, SKB, Stockholm.  
May 1985
- 10-27 Nilsson S, Ittner T, Carbol P, Gustafsson E, Mathiasson L, Nordqvist R, Skarnemark G, Skålberg M, Sundblad B**  
A Chernobyl fallout redistribution study in a forested catchment area in northern Sweden.  
Sci. Tot. Environment, to be published.
- 10-28 Carbol P, Skålberg M, Skarnemark G**  
Speciation of the Chernobyl fallout by sequential chemical separation. Science of the total environment (in print).  
1992
- 10-29 Carbol P, Skålberg M, Skarnemark G**  
Chemical speciation of radionuclides originating from the Chernobyl fallout – Gideå study site – V. Science of the total environment (in print).  
1992
- 10-30 Skålberg M, Carbol P, Gustavsson E, Ittner T, Mathiasson L, Skarnemark G, Sundblad B**  
The Gideå study site – Area description and deposition pattern of the Chernobyl fallout.  
Sci. Tot. Environment, to be published.  
1992
- 10-31 Strand P, Selnaes T D, Reitan J B**  
Area and time distribution of external and internal doses from Chernobyl fallout the lack of correlation in Norway. Health physics v 62 no 6.  
June 1992

- 10-32 Whicker F W**  
Scenario B8; The relative importance of ingestion for multiple pathway dose assessments. BIOMOVS Technical Report 11 National Institute of Radiation Protection, Stockholm, Sweden.  
Sept 1990
- 10-33** Se 6-17.
- 10-34 Grogan H A**  
Scenario B2 Irrigation with Contaminated Groundwater. BIOMOVS Technical Report 6 National Institute of Radiation Protection, Stockholm, Sweden.  
1989
- 10-35 Bergström U, Nordlinder S**  
Individual radiation doses from unit releases of long lived radionuclides.  
SKB Technical Report TR 90-09, Stockholm.  
April 1990
- 10-36 Bergstrom U, Nordlinder B**  
Individual doses from radionuclides released to the Baltic coast.  
SKB Technical Report TR 91-41, Stockholm.  
1991
- 10-37 ICRP**  
Age-dependent Doses to members of the public from intake of radionuclides.  
Annals of the ICRP. ICRP publ no 56, Pergamon press.  
1990
- 10-38 ICRP**  
Limits for intake of radionuclides by workers.  
Annals of the ICRP. ICRP publ no 30, Pergamon press.  
1982
- 10-39 Wrenn M R**  
Is thorium really more radiotoxic than plutonium?  
Health physics v62 no 6 pp s 39.  
June 1992
- 10-40 Sundblad B, Mathiasson L, Holby O, Landström O, Lampe S**  
Chemistry of soil and sediments, hydrology and natural exposure rate measurements at the Äspö hard rock laboratory.  
SKB Progress Report PR 25-91-08, Stockholm.  
1991
- 10-41 Zeevaert T, Jones C**  
Transfer from the geosphere to the biosphere through two different receptor types.  
Proc from "The validity of environmental transfer models BIOMOVS", October 8-10, 1990, Swedish Radiation Protection Institute, Stockholm, Sweden.
- 10-42 Nordlinder S, Bergström U**  
A dynamic model of the Cs-137 concentration in fish applied to seven different lake ecosystems – a VAMP scenario. Presented at the 6th Nordic Radioecological seminar, Torshavn Faroe Islands 14-18 June 1992.  
Studsvik report NS-92/44.  
1992

- 10-43** NEA PSAC User Group, PSACOIN level 1b Intercomparison.  
NEA/OECD, Paris.  
1992
- 10-44** IAEA  
Effects on ionizing radiation on plants and animals at level implied by current radiation standards.  
Technical report series no 332, IAEA, Vienna.  
1992.
- 10-45** IAEA  
Assessing the impact of deep sea disposal of low level waste on living marine resources.  
Technical report series no 288, IAEA Vienna.  
1988

## ***Kapitel 11***

- 11-1** Se 1-10.
- 11-2 Juhlin C, Sandstedt H**  
Storage of nuclear waste in very deep boreholes.  
SKB Technical Report TR 89-39, Stockholm.  
1989
- 11-3 Sandstedt H, Wickman C, Pusch R, Börgesson L, Lönnerberg B**  
Storage of nuclear waste in long boreholes.  
SKB Technical Report TR 91-35, Stockholm.  
1991
- 11-4** Se 2-15.
- 11-5** Se 1-7.
- 11-6** Äspörampen. Föredrag på Bergmekanikdagen 1992.
- 11-7 Pusch R**  
Influence of various excavation techniques on the structure and physical properties of "near field" rock around large boreholes.  
SKB Technical Report TR 89-32, Stockholm.  
1989
- 11-8 Autio J**  
Description of Tamrock equipment for boring vertical deposition holes.  
SKB Arbetsrapport AR 92-40, Stockholm.  
1992
- 11-9 Pusch R et al.**  
Sealing Project Executive Summary and General Conclusions of the Rock Sealing Project.  
Stripa Project Technical Report 92-27, SKB, Stockholm.  
1992
- 11-10 Pusch R, Börgesson L**  
Final Report of the Buffer Mass Test – Volume II: test results.  
Stripa Project Technical Report 85-12, SKB, Stockholm.  
1985

**11-11 Pusch R, Börgesson L, Ramqvist G**

Final Report of the Borehole, Shaft and Tunnel Sealing Test – Volume II: Shaft plugging.

Stripa Project Technical Report 87-07, SKB, Stockholm.

1987

**11-12 Pusch R, Börgesson L, Ramqvist G**

Final Report of the Borehole, Shaft and Tunnel Sealing Test – Volume III: Tunnel plugging.

Stripa Project Technical Report 87-03, SKB, Stockholm.

1987

**11-13 Pusch R, Börgesson L, Ramqvist G**

Final Report of the Borehole, Shaft and Tunnel Sealing Test – Volume I: Borehole plugging.

Stripa Project Technical Report 87-01, SKB, Stockholm.

1987