



FUD-PROGRAM 95

Kärnkraftavfallets behandling och slutförvaring

Program för inkapsling, geologisk djupförvaring samt forskning,
utveckling och demonstration

September 1995

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING AB

BOX 5864 S-102 40 STOCKHOLM

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

FUD-program 95

Kärnkraftavfallets behandling och slutförvaring

**Program för inkapsling, geologisk djupförvaring samt
forskning, utveckling och demonstration**

September 1995

FÖRORD

Lagen om kärnteknisk verksamhet (SFS 1992:1536) 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 fjärde program är att fullgöra ovanstående redovisningskrav. Programmet ansluter till det program som redovisades i FUD-program 92 och i den 1994 inlämnade kompletterande redovisningen till detta. Tonvikten ligger på genomförande av de projekt som krävs för att inleda deponering av inkapslat bränsle enligt de planer som presenterades i nämnda program. Programmet omfattar även de stödjande forsknings- och utvecklingsinsatser som krävs för nämnda projekt samt dessutom uppföljning av och forskning kring alternativa metoder.

Denna rapport beskriver programmet i sin helhet. Samtidigt med utarbetande av detta FUD-program har även några viktiga studier slutförts. Sålunda har en förstudie för Storumans kommun slutrapporterats. Under hösten 1995 avrapporterar vidare en förstudie för Malå kommun, en rikstäckande genomgång av förutsättningar och bakgrund för lokaliseringsarbetet – Översiktsstudie 95 – samt en mall för säkerhetsrapporter – SR 95 – som beskriver metoder för och uppläggning av kommande redovisningar av den långsiktiga säkerheten för ett djupförvar. Dessa rapporter innehåller material som har stort intresse för SKB:s fortsatta program.

Stockholm i september 1995

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING AB



Sten Bjurström

VD



Per-Eric Ahlström

vVD o chef Utveckling

FUD-PROGRAM 95 – KORT SAMMANFATTNING

I FUD-program 92 presenterade SKB en delvis ny inriktning på verksamheten. Den nya inriktningen innebar en fokusering och koncentration på genomförande av djupförvaring av en begränsad mängd (ca 800 ton) använt inkapslat kärnbränsle under den kommande 20-årsperioden. Efter denna inledande deponering skall resultaten av arbetet utvärderas och först därefter beslutas om hur och när reguljär deponering skall ske av huvuddelen av bränslet och av annat långlivat avfall.

Planeringen i FUD-program 92 baserades på att tillgängliga kunskaper är tillräckliga för att:

- välja en prioriterad systemutformning för hantering av det använda kärnbränslet,
- utse kandidatplatser för djupförvaret,
- karakterisera dessa platser,
- genomföra nödvändiga säkerhetsanalyser och
- anpassa djupförvarets utformning till de lokala förhållandena.

Utvecklingen sedan FUD-program 92 presenterades har bekräftat och stärkt denna bedömning. Inriktningen av programmet accepterades i allt väsentligt av myndigheter och regering efter en omfattande remissbehandling.

I slutet av 1992 fokuserade och ökade SKB arbetet på projektering och lokalisering av en anläggning för inkapsling av använt kärnbränsle och ett djupförvar. Erforderligt utvecklingsarbete samordnas med projekteringsarbetet på det sätt som redovisats i av regeringen begärd komplettering till FUD-program 92. Detsamma gäller den forskning och utveckling som behövs för att genomföra säkerhetsanalyser och ge underlag för kommande säkerhetsredovisningar.

Lokalisering av inkapslingsanläggningen har föreslagits ske vid det centrala lagret för använt kärnbränsle, CLAB, vid Oskarshamns kärnkraftverk. Lokaliseringen av djupförvaret sker stegvis och arbetet har påbörjats med förstudier. Dessa, som planeras för fem till tio kommuner, tar mer tid i anspråk än vad som förutsågs 1992. Efter förstudierna planeras geovetenskapliga platsundersökningar av två platser. Därefter väljs en plats för detaljerade undersökningar med schakt/tunnlar till förvaringsdjup. En samlad redovisning av de rikstäckande översiktsstudierna har begärts av regeringen och myndigheterna. En sådan redovisning publiceras i en separat rapport hösten 1995.

Målet är att påbörja deponering av inkapslat bränsle 2008. Tidplanen måste dock kunna anpassas med hänsyn till den tid som krävs för att genomföra lokaliseringen av djupförvaret och för att erhålla därmed förknippade beslut. SKBs ambition är att genomföra lokalisering och utbyggnad av erforderliga anläggningar i samförstånd

med berörda kommuner och berörd lokalbefolkning. Arbetet med att i en öppen och bred process ta fram en miljökonsekvensbeskrivning (MKB) intar en central roll i detta sammanhang. Regeringen har angett att länsstyrelsen i berörda län skall ha en samordnande funktion i denna MKB-process. I beslutet över SKBs komplettering till FUD-program 92 har regeringen också klarställt några viktiga frågor i processen för tillståndsgivning bl a kopplingen mellan inkapslingsanläggning och djupförvar samt att påbörjande av detaljundersökning för djupförvaret även innebär start av bygge av djupförvaret och därför kräver tillstånd enligt såväl naturresurslagen som kärntekniklagen.

Tidplanen är också kopplad till att vissa kunskaper skall föreligga innan nästa steg tas. Bland annat skall olika val och ansökningar baseras på omfattande analyser av djupförvarets långsiktiga säkerhet. Dessa kommer att baseras på vid tillfället tillgängliga data, som successivt preciseras. Detta innebär att tidplanen även påverkas av den takt med vilken erforderliga fortsatta utvecklingsinsatser kan genomföras. SKB bedömer att osäkerheterna kring tidplanen kan bemästras och att det finns goda möjligheter att nå målet.

Viktiga utvecklingsarbeten planeras inom följande områden:

- kapseltillverkning och kapselförslutning – en provanläggning för förslutning och icke-förstörande provning övervägs,
- utformning av kapselinsats,
- utformning av hanteringsutrustning för deponering av inkapslat bränsle,
- material och utförande för återfyllning av deponeringstunnlar och andra berggrum,
- granskning av osäkerheter och giltighet för de metoder som skall användas i säkerhetsanalyser,
- fortsatt utveckling av metodik för definition av scenarier som skall redovisas i säkerhetsrapporter.

FoU-arbetet med att vidareutveckla kunskap och dataunderlag för genomförande av säkerhetsanalyser fortsätter inom bl a områdena geovetenskap, kemi, naturliga analogier och biosfär samt rörande egenskaper hos använt kärnbränsle och buffertmaterial.

Äspölaboratoriet är en central resurs för fortsatt utveckling och forskning kring barriärfunktioner, mätmetoder och arbetsmetoder. Ett omfattande program med verifierande försök enligt de planer som presenterades i FUD-program 92 har inletts och fortsätter under de kommande åren.

Ett brett internationellt samarbete utgör en viktig komponent i SKBs arbete. Nio utländska organisationer från åtta länder medverkar genom bilaterala avtal i arbetet vid

Äspölaboratoriet. Även inom andra områden sker ett omfattande internationellt kunskapsutbyte. Genom detta samarbete får Sverige direkt tillgång till världsledande experter på många områden. Detta bidrar till att upprätthålla en fortsatt hög kvalitet på FoU-arbetet.

SKB fortsätter att följa utvecklingen på alternativa metoder för hantering, behandling och slutligt omhändertagande av det använda kärnbränslet bl a genom stöd till svensk forskning inom några nyckelområden.

Vid sidan av de tekniska och säkerhetsmässiga aspekterna är det viktigt att fortlöpande utveckla formerna för hur kunskap och fakta om kärnavfallshanteringen kommuniceras i samhället. SKB kommer att ägna stort utrymme i sin verksamhet åt MKB-processens genomförande vid lokalisering och anläggning av såväl inkapslingsanläggning som djupförvar. Detta ställer höga krav på bred och saklig information med god pedagogik samt fordrar en öppen attityd.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	Sida
SAMMANFATTANDE ÖVERSIKT	xv
1 INLEDNING, BAKGRUND	1
1.1 RIKTLINJER FÖR AVFALLSHANTERINGEN	1
1.2 GÄLLANDE LAGSTIFTNING M M	1
1.3 HISTORIK	2
1.4 FUD-PROGRAM 92 – REMISSBEHANDLING	2
1.5 AVFALL FRÅN DET SVENSKA KÄRNKRAFT-PROGRAMMET	2
1.6 EXISTERANDE SYSTEM FÖR HANTERING AV RADIOAKTIVT AVFALL FRÅN KÄRNKRAFT-VERKEN	3
2 MÅL FÖR PROGRAMMET	5
2.1 MÅL	5
2.2 PRINCIPIELL UTFORMNING AV DJUPFÖRVARET	6
3 STEGVIS UTVECKLING OCH UTBYGGNAD	9
3.1 METODVAL	9
3.1.1 Djupförvaring i urberg	9
3.1.2 Direkt slutförvaring utan uppärbetning	9
3.1.3 Alternativ för geologisk djupförvaring	10
3.2 NOLLALTERNATIV	10
3.3 ÖVERSIKT ÖVER ÅTGÄRDER VID STEGVIS UTBYGGNAD	10
3.4 MILJÖKONSEKVENSBESKRIVNING OCH MKB-PROCESS	12
4 DJUPFÖRVARING – PRINCIPER OCH KRAV	15
4.1 VILKEN KUNSKAP KRÄVS?	15
4.1.1 Hantering, behandling, transport och deponering av avfallet	15
4.1.2 Lokalisering och uppförande av erforderliga anläggningar	15
4.1.3 Säkerhetsanalyser och miljökonsekvensbeskrivningar	16
4.2 PRINCIPER FÖR STRÅLSKYDD OCH SÄKERHET	17
4.2.1 Allmänt	17
4.2.2 Förvarets säkerhetsfunktioner	17
4.2.3 Barriärernas säkerhetsfunktioner	19
4.3 BARRIÄRFUNKTIONER – KRAV	20
4.3.1 Allmänt	20
4.3.2 Förlägningsplats och berget som barriär	20
4.3.3 Kapsel	21
4.3.4 Buffert	21
4.3.5 Förvarets och närområdets utformning	21

	Sida
5	KUNSKAPSLÄGE – LÅNGSIKTIG
	SÄKERHET 23
5.1	METODER FÖR SÄKERHETSANALYS 23
5.1.1	Allmänt 23
5.1.2	Konceptuella och numeriska modeller 24
5.1.3	Numerisk koppling mellan modeller 26
5.1.4	Osäkerhet och validitet 26
5.2	SCENARIER 27
5.2.1	Allmänt 27
5.2.2	Huvudsakliga steg i metodiken för att ta fram scenarier 27
5.2.3	Pågående arbete 30
5.3	ANVÄNT BRÄNSLE 30
5.3.1	Korrosion av använt bränsle 30
5.3.2	Övriga komponenter i närområdet 34
5.3.3	Modeller 34
5.3.4	Naturliga analogier 34
5.3.5	Verksamheten i förhållande till mål i FUD-program 92 35
5.4	BUFFERT OCH ÅTERFYLNING 35
5.4.1	Funktionskrav 35
5.4.2	Utvecklingssteg och sammanställning av hittills vunna kunskaper 36
5.4.3	Olika bentonitmaterials egenskaper 36
5.4.4	Beräkningsmodeller för olika funktioner 37
5.4.5	Gastransport 37
5.4.6	Bakterier 37
5.4.7	Betong 37
5.4.8	Avklarade frågor och kvarstående frågeställningar 38
5.5	BERGGRUNDEN 38
5.5.1	Bergets roll i djupförvaret 38
5.5.2	Geovetenskapliga data och osäkerhet 39
5.5.3	Verksamhetens generella mål 39
5.5.4	Strukturgeologi och mekanisk stabilitet 40
5.5.5	Grundvattenkemi 47
5.5.6	Bergets förmåga att begränsa nuklidtransport 51
5.5.7	Projekt "Djupborring KLX 02 – Laxemar" 56
5.5.8	Modellverktyg och modellutveckling 56
5.6	KEMI 61
5.6.1	Radionuklidkemi 62
5.6.2	Organiska ämnen, kolloider och mikrober 63
5.6.3	Valideringsexperiment 63
5.6.4	Miljöfarliga ämnen 64

	Sida	
5.7	NATURLIGA ANALOGIER	64
5.7.1	Naturliga analogier och säkerhetsanalys	64
5.7.2	Cigar Lake	64
5.7.3	Jordanien	65
5.7.4	Oklo	65
5.7.5	Palmottu	65
5.7.6	Övrigt	65
5.7.7	Resultat i förhållande till mål i FUD-program 92	67
5.8	BIOSFÄREN	67
5.8.1	Allmänt	67
5.8.2	Databehov	68
5.8.3	Modellutveckling	68
5.8.4	Resultat i förhållande till mål i FUD-program 92	68
5.9	ANNAT AVFALL	68
5.9.1	Förstudie	69
5.9.2	Inventering av avfallet	69
5.9.3	Laboratorieundersökningar	69
5.9.4	Funktionsanalys av barriärerna i närområdet	70
5.9.5	Resultat i förhållande till mål i FUD-program 92	70
6	KUNSKAPSLÄGE – KAPSEL OCH INKAPSLING	71
6.1	FÖRUTSÄTTNINGAR	71
6.2	UTVECKLING OCH UTFORMNING AV KAPSEL	72
6.2.1	Allmänt	72
6.2.2	Funktions- och egenskapskrav	72
6.2.3	Kriterier för dimensionering och utformning	73
6.2.4	Referenskapsel	74
6.2.5	Kapselstorlek	75
6.2.6	Kriticitetsfrågor	75
6.3	MATERIALFRÅGOR	76
6.3.1	Undersökta material	76
6.3.2	Resultat av materialundersökningar	76
6.3.3	Sammanfattning	79
6.4	KAPSELTILLVERKNING	80
6.4.1	Resultat från provtillverkningen	80
6.4.2	Studier av andra metoder	82
6.4.3	Kvalitetssäkring och kontrollmetoder	83
6.4.4	Sammanfattning	83
6.5	FÖRSLUTNINGSTEKNIK	84
6.5.1	Resultat från provsvetsning	84
6.5.2	Utredning av andra svetsmetoder	85
6.5.3	Oförstörande provning	85
6.5.4	Sammanfattning	86
6.6	INKAPSLINGSANLÄGGNINGEN	86
6.6.1	Lokalisering och MKB-process	86
6.6.2	Inkapslingsprocessen	86

	Sida	
7	PROGRAM FÖR KAPSEL OCH INKAPSLING	91
7.1	FÖRUTSÄTTNINGAR OCH MÅL	91
7.2	ALTERNATIVA LOKALISERINGAR OCH PROGRAM	91
7.3	PROJEKTERING AV INKAPSLINGSANLÄGGNINGEN SAMT KOPPLINGAR TILL ARBETET MED KAPSELUTVECKLING	92
7.4	UTVECKLING OCH UTFORMNING AV KAPSEL	95
7.4.1	Kriterier för dimensionering och utformning	95
7.4.2	Dimensionering och utformning av kapseln	97
7.4.3	Alternativa kapselutformningar	98
7.5	UTVECKLING AV TILLVERKNINGSTEKNIK	98
7.6	UTVECKLING AV FÖRSLUTNINGSTEKNIK	99
7.7	PILOTANLÄGGNING FÖR KAPSELFÖRSLUTNING	99
7.8	UPPFÖRANDE OCH DRIFT AV INKAPSLINGSANLÄGGNINGEN	99
7.9	SÄKERHET, KVALITET OCH SAFEGUARD	100
8	KUNSKAPSLÄGE – DJUPFÖRVAR	103
8.1	UTFORMNING, BYGGE, DRIFT OCH FÖRSLUTNING AV ETT DJUPFÖRVAR FÖR ANVÄNT KÄRNBRÄNSLE OCH ANNAT LÅNGLIVAT AVFALL	104
8.1.1	Anläggningsutformning	104
8.1.2	Byggmetoder	107
8.1.3	Teknik för deponering	108
8.1.4	Förslutning, återtag och övervakning	108
8.1.5	Arbetsmiljö	109
8.1.6	Fysiskt skydd och safeguards	110
8.1.7	Förvarsdjupets inverkan på förvarsfunktionen	110
8.1.8	Miljöeffekter	111
8.1.9	Samhälleliga effekter av djupförvaret	111
8.2	UNDERSÖKNING OCH UTVÄRDERING AV PLATSER	112
8.2.1	Erfarenheter från platsundersökningar	112
8.2.2	Erfarenheter från Äspölaboratoriet	112
8.2.3	Data från platsundersökningar	113
8.2.4	Metod- och instrumentutveckling	114
8.2.5	Datahantering och databearbetning	114
8.2.6	Rutiner och kvalitetsprogram	116
8.3	GENOMFÖRDA LOKALISERINGSSTUDIER	116
8.3.1	Kort historik	116
8.3.2	Översiktsstudier i nationell skala	117
8.3.3	Förstudier	118
8.4	TRANSPORTER TILL DJUPFÖRVARET	119
8.4.1	Godstyper och godsmängder	119
8.4.2	Transportsätt för radioaktivt material	119
8.4.3	Transportsäkerhet	120
8.4.4	Erfarenheter av dagens transporter	121

	Sida	
9	PROGRAM FÖR DJUPFÖRVAR	123
9.1	REGERINGSBESLUT ANGÅENDE LOKALISERINGS- PROCESSEN	123
9.2	ETAPPINDELNING AV DJUPFÖRVAR- PROGRAMMET	124
9.3	PROGRAM FÖR LOKALISERINGSSTUDIER	126
9.3.1	Förstudier	126
9.3.2	Platsundersökningar	127
9.4	GEOVETENSKAPLIGA UNDERSÖKNINGAR	127
9.4.1	Allmänt	128
9.4.2	Genomförande	128
9.4.3	Metoder och instrument	129
9.4.4	Datahantering och kvalitetssäkring	133
9.5	PROJEKTERING	134
9.5.1	Förutsättningar	134
9.5.2	Projekteringsprocessen	134
9.5.3	Planerade projekteringsinsatser fram till ansökan om lokalisering och utbyggnad för detaljunder- sökning	135
9.6	TEKNIK FÖR BYGGE, DRIFT OCH FÖRSLUTNING AV DJUPFÖRVARET	137
9.6.1	Bygge	137
9.6.2	Utveckling av maskiner och utrustningar	138
9.6.3	Applicering av buffert och återfyllning	139
9.6.4	Förslutning	140
9.6.5	Övervakning	141
9.7	ARBETEN AVSEENDE FÖRVARSDDEL FÖR ANNAT AVFALL	141
9.8	DRIFTSÄKERHET OCH SAFEGUARD	141
9.9	TRANSPORTER	141
10	PROGRAM FÖR SÄKERHETS- ANALYSER M M	143
10.1	ÖVERSIKT	143
10.2	ANSÖKAN OM TILLSTÅND FÖR INKAPS- LINGSANLÄGGNINGEN	143
10.3	ANSÖKAN OM TILLSTÅND FÖR DJUPFÖR- VARET	145
10.4	ANSÖKAN OM TILLSTÅND FÖR DRIFT – STEG 1	146
10.5	ÖVRIGA TILLSTÅNDSANSÖKNINGAR	147

	Sida	
11	PROGRAM FÖR STÖDJANDE FoU	149
11.1	ALLMÄNT	149
11.2	ANVÄNT BRÄNSLE	149
11.2.1	Fördjupad förståelse för hur radioaktiva ämnen frigörs från använt bränsle	149
11.2.2	Förbättring av nu tillgängliga modeller	150
11.2.3	Realistisk modell för frigörelsen från bränslet	150
11.3	BUFFERT OCH ÅTERFYLLNING	151
11.4	BERGGRUNDEN	152
11.4.1	Strukturgeologi och mekanisk stabilitet	152
11.4.2	Grundvattenkemi	153
11.4.3	Bergets förmåga att begränsa radionuklidtransport	153
11.4.4	Modellverktyg och modellutveckling	154
11.5	KEMI	155
11.6	BIOSFÄREN	155
11.7	SÄKERHETSANALYSMETODER	156
11.7.1	Metodutveckling	156
11.7.2	Modellutveckling	157
11.8	NATURLIGA ANALOGIER	159
11.8.1	Jordanien	159
11.8.2	Oklo	159
11.8.3	Palmottu	160
11.8.4	Övrigt	160
11.9	ANNAT AVFALL OCH SFR-AVFALL	160
11.9.1	Annat avfall	160
11.9.2	SFR-avfall	161
12	PROGRAM FÖR ÄSPÖLABORATORIET	163
12.1	INLEDNING	163
12.2	MÅL	163
12.3	RESULTAT – NUVARANDE LÄGE RELATIVT ETAPPMÅLEN	164
12.4	FASTSTÄLLANDE AV DETALJUNDERSÖKNINGSMETODIK, PROGRAM FÖR 1996-2001	165
12.4.1	Allmänt	165
12.4.2	ZEDEX – En studie av den störda zonen för sprängd och borrarad tunnel	165
12.4.3	Rock Visualization System	166
12.4.4	Hydrotestutrustning för underjordsmätning	167
12.4.5	Test och vidareutveckling av undersökningsmetodik för detaljundersökningar	167

	Sida	
12.5	TEST AV MODELLER FÖR BESKRIVNING AV BERGETS BARRIÄRFUNKTION, PROGRAM FÖR 1996-2001	167
12.5.1	Allmänt	167
12.5.2	Klassificering och karakterisering av sprickor (Fracture Classification and Characterization, FCC)	168
12.5.3	Tracer Retention Understanding Experiments – TRUE	168
12.5.4	REX – Redoxförsök i detaljskala	169
12.5.5	Radionuklidretention	170
12.5.6	Hydrokemimodellering	171
12.5.7	Avgasning av grundvatten och två-fasflöde	171
12.6	DEMONSTRERA TEKNIK FÖR OCH FUNKTION HOS VIKTIGA DELAR I FÖRVARSSYSTEMET, PROGRAM FÖR 1996-2001	174
12.6.1	Allmänt	174
12.6.2	Provning av olika återfyllnadsmaterial	174
12.6.3	Prototypförvar	177
12.6.4	Långtidsprov av buffertmaterialets funktion	177
12.6.5	Sprickbildning vid tunneldrivning med TBM	179
12.6.6	Lokalisering av lämpliga närområden	179
12.6.7	Test av injekteringsmetodik	179
12.7	TIDPLAN FÖR GENOMFÖRANDE AV FÖRSÖKEN	181
12.8	INTERNATIONELLT DELTAGANDE	181
12.9	GENOMFÖRANDE, ORGANISATION, INFORMATION	181
13	ALTERNATIVA METODER	183
13.1	SEPARATION OCH TRANSMUTATION (P&T) AV LÅNGLIVADE RADIOAKTIVA ÄMNEN	183
13.1.1	Bakgrund	183
13.1.2	Radionuklider av intresse för P&T	183
13.1.3	Transmutation	183
13.1.4	Upparbetning och separation	184
13.1.5	Återföring och förluster	185
13.1.6	Pågående P&T program i andra länder	187
13.1.7	Några slutsatser	188
13.2	GEOVETENSKAPLIGA FÖRHÅLLANDEN PÅ STORA DJUP	189
14	RIVNING AV KÄRNTEKNISKA ANLÄGGNINGAR	191
14.1	BAKGRUND	191
14.2	MÅL OCH ÖVERSIKTLIG PLAN	191
14.3	KUNSKAPSLÄGET	192
14.3.1	Sverige	192
14.3.2	Internationellt	192
14.4	FORSKNINGSPROGRAM 1996-2001	194

		Sida
15	PROGRAMMETS GENOMFÖRANDE – OSÄKERHETER I TIDSPLANEN; KOSTNADER	197
15.1	GENOMFÖRANDE	197
15.2	OSÄKERHETER I TIDSPLANEN	197
15.2.1	Djupförvarets lokalisering	197
15.2.2	Inkapslingsanläggning	198
15.2.3	Detaljundersökning inför inledande drift m m	198
15.3	KOSTNADER OCH PRIORITERINGAR	198
	REFERENSER	201
	BILAGA 1: Forskningsinstitutioner, konsulter, entreprenörer m fl som medverkat i SKBs FUD-program under 1994	229

SAMMANFATTANDE ÖVERSIKT

1 INLEDNING

Målet för SKBs avfallshantering är att på ett säkert sätt ta hand om alla radioaktiva restprodukter som uppkommer vid de svenska kärnkraftverken och andra kärntekniska anläggningar i landet. Vidare skall SKB på ett säkert sätt ta om hand annat radioaktivt avfall som uppkommer i Sverige.

Radioaktivt avfall från det svenska kärnkraftsprogrammet har varierande form och aktivitetsinnehåll, alltifrån praktiskt taget inaktivt sopavfall till använt bränsle, som har mycket högt aktivitetsinnehåll. Olika avfallsformer ställer därför olika krav på hantering och slutförvaring.

Forskning rörande hantering och slutförvaring av radioaktivt avfall började i större omfattning i Sverige år

1975. Det arbete som därmed inleddes har under de följande 20 åren lett fram till att det utvecklats och byggts ett system som idag hanterar och tar hand om allt radioaktivt avfall som uppkommer från kärnkraftverksamheten i Sverige och även från sjukvård, forskning och industri.

Figur 1 ger en översikt av de olika delarna i det svenska avfallshanteringssystemet. Dessa beskrivs utförligt i den årliga redovisningen av kostnaderna för att ta hand om kärnkraftens radioaktiva restprodukter, senast PLAN 95, som SKB lämnat.

Utformningen av systemet baseras på följande grundläggande principer:

- Kortlivat avfall deponeras snarast efter att det uppkommit.
- Använt bränsle mellanlagras i 30-40 år innan det placeras i djupförvar. Därigenom begränsas värmeutvecklingen i djupförvaret.
- Övrigt långlivat avfall deponeras i anslutning till djupförvaret för använt bränsle.

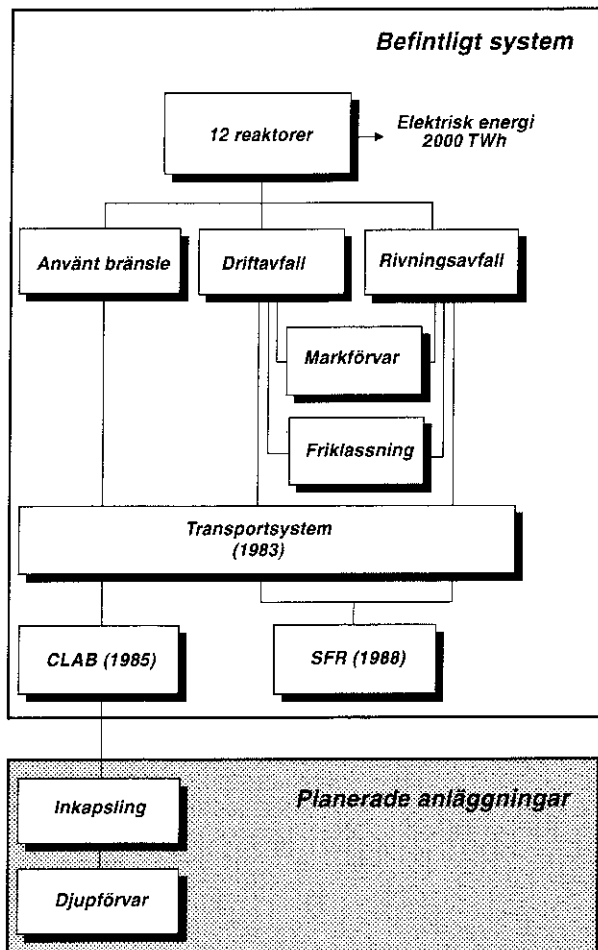
Väsentliga delar av avfallshanteringssystemet är redan i drift, nämligen det centrala lagret för använt bränsle, CLAB, slutförvaret för radioaktivt driftavfall, SFR, och transportsystemet. Under början av 2000-talet planeras utbyggnad av ytterligare lagringsutrymme i CLAB och SFR för att kunna ta hand om allt använt bränsle och avfall från det svenska programmet.

Det som återstår att bygga av erforderligt system är en inkapslingsanläggning för använt bränsle och ett djupförvar för långlivat avfall samt erforderliga kompletteringar av transportsystemet för att frakta inkapslat kärnbränsle och annat avfall till djupförvaret. Därtill behöver SFR byggas ut för att ta emot rivningsavfall.

2 MÅL

I FUD-program 92 redovisade SKB sin och därmed berörd kraftindustris planering för genomförande av djupförvaring av det långlivade radioaktiva avfall inklusive det använda kärnbränslet som uppkommer vid driften av de svenska kärnkraftverken. Planeringen innebär i korthet:

- Målet är att, med uppfyllande av alla miljö- och säkerhetskrav, år 2008 påbörja deponering i ett djupförvar av en mindre del (ca 800 ton) av det använda kärnbränslet.
- Inriktningen är inkapsling i kopparkapslar. Djupförvaringen avses genomförd enligt det s k KBS-3-kon-



Figur 1. Översikt av det svenska avfallshanteringssystemet.

ceptet eller närliggande optimerat utförande på ca 500 m djup i urberg.

- En inkapslingsanläggning utförs som en tillbyggnad av CLAB.
- Ett djupförvar lokaliserar till en lämplig plats i Sverige som dels ger möjlighet att uppfylla högt ställda säkerhetskrav och dels ger möjlighet att utföra erforderlig verksamhet i samförstånd med berörd kommun och berörd befolkning.
- Säkerhets- och strålskyddsfrågorna kommer att penetreras grundligt och redovisas innan beslut om väsentliga bindande åtgärder tas.

Detta är samma måltidpunkt som ställdes upp i FUD-program 92. Med hänsyn till den utveckling som inträffat sedan dess har dock tidplanen för tillståndsansökningar senarelagts något.

Tidplanen för arbetet med djupförvar och inkapslingsanläggning styrs emellertid inte enbart av SKBs insatser. Den är i hög grad även beroende av den acceptans som SKBs verksamhet får i berörda kommuner och av i vilken takt olika beslut kan fattas på lokal nivå och på rikspanet. Tidplanen påverkas också av de lokala tekniska och geologiska förhållanden som finns på de platser som kommer att undersökas. SKB bedömer att osäkerheterna kring tidplanen kan bemästras och att det finns goda möjligheter att nå målet.

Planeringen i FUD-program 92 baserades på att tillgängliga kunskaper är tillräckliga för att välja en prioriterad systemutformning för hantering av det använda kärnbränslet, för att utse kandidatplatser för djupförvaret, för att karakterisera dessa platser, för att anpassa förvarets utformning till de lokala förhållandena och för att genomföra nödvändiga säkerhetsanalyser. Utvecklingen sedan FUD-program 92 presenterades har bekräftat och stärkt denna bedömning. Inriktningen av programmet accepterades också i allt väsentligt av myndigheterna och regeringen efter en omfattande remissbehandling.

Samtidigt som arbetet med denna huvuduppgift genomförs kommer SKB att följa och i begränsad omfattning stödja FoU på alternativa utvecklingslinjer.

3 STEGVIS UTVECKLING OCH UTBYGGNAD

I svensk miljölagstiftning har på senare år införts krav på miljökonsekvensbeskrivning – MKB – av den anläggning eller det system för vilket man söker tillstånd. I förarbetena till lagen sägs att MKB även skall belysa konsekvenserna av alternativa metoder/utföranden inklusive ett så kallat nollalternativ innebärande att den anläggning eller det system för vilket tillstånd sökes ej kommer till stånd. I debatten om det svenska kärnavfallsprogrammet hävdas ibland att "ingen metod har ännu valts",

"SKB har för bråttom (med lokalisering av djupförvaret), det finns ännu ingen metod utarbetad" o s v. En historisk återblick ger dock vid handen att en stegvis avgränsning av de studerade metoderna för behandling och slutförvaring av det högaktiva avfallet har skett. Vidare har val mellan olika principiella metoder genomförts. Dessa avgränsningar och val har presenterats och diskuterats i de successivt redovisade programmen och genomförts efter bred remissbehandling och omfattande offentlig granskning. Genom denna process har huvudinriktningen av det svenska kärnavfallsprogrammet utvecklats i samförstånd mellan industri, myndigheter och regering. I anslutning till kommande lokaliseringsansökningar för de planerade anläggningarna kommer alternativ att redovisas och prövas till den metod, den utformning och den lokalisering som ansökan gäller.

Den successiva fokusering av programmet som skett sedan den så kallade Aka-utredningen på 1970-talet innebär att arbetet sedan mitten av 1980-talet är inriktat mot slutmålet djupförvaring i svensk berggrund av det använda kärnbränslet utan föregående upparbetning. Olika alternativa utformningar av ett djupförvar har studerats. Resultaten av dessa studier har redovisats bl a i de program som SKB rapporterade 1989 och 1992. Slutsatsen som drogs i FUD-program 92 är att *Djupförvaringen avses genomförd enligt det så kallade KBS-3-konceptet eller närliggande optimerat utförande på ca 500 m djup i urberg.* Denna inriktning för det första utbyggnadssteget (se nedan) har i allt väsentligt accepterats av myndigheter och regering.

För närvarande lagras allt använt kärnbränsle i CLAB eller vid kärnkraftverken. Erfarenheter från långtidslagring av zirkaloy-kapslat bränsle sträcker sig tillbaka till slutet av 1950-talet. Dessa erfarenheter visar att lagring i åtminstone 50 år är möjlig och sannolikt kan lagringen vid behov utsträckas till åtminstone 100 år. Med hänsyn till lagringstid och lagringskapacitet finns således möjlighet att fortsätta med lagring i CLAB ännu under flera årtionden. Detta blir då ett naturligt "nollalternativ" i det framtida MKB-arbetet för djupförvaret och inkapslingsanläggningen. Kompletterande säkerhetsanalyser (tidsperspektiv 100-tals år) planeras för detta alternativ.

Utbyggnaden av djupförvaret avses ske i två steg med en grundlig utvärdering av det första steget och ny, uppdaterad säkerhetsredovisning och -granskning innan man fortsätter med det andra steget. Det första steget avses omfatta ca 800 ton använt kärnbränsle (ca 10% av förväntad mängd) och kan vara genomfört tidigast om ca 20 år. Vid den därpå följande utvärderingen har man möjlighet att beakta all den utveckling som ägt rum under dessa 20 år. Man kan också om så befinner sig önskvärt återta det redan deponerade avfallet för annan behandling.

Beslut om lokalisering, bygge och drift av inkapslingsanläggning och djupförvar kommer att tas i etapper efter tillståndsprövning baserat på successivt fördjupat underlag och med möjlighet till att i varje etapp beakta ny kunskap. En viktig komponent är den MKB-process som kommer att leda fram till miljökonsekvensbeskrivningar

(MKB) för anläggningarna. Denna process kommer att involvera såväl SKB och centrala myndigheter som berörda kommuner, länsstyrelser och lokala intressenter. För inkapslingsanläggningen har MKB-processen redan startat och för djupförvaret förbereds den i förstudierna och genomförs i full omfattning i och med platsundersökningar. I realiteten har mycket av arbetet redan genom den omfattande offentliga granskningen av SKBs planer och program drivits i MKB-processens anda långt innan detta blev ett formellt krav.

4 INKAPSLING AV BRÄNSLE

Programmet för kapsel och inkapsling omfattar främst utveckling och tillverkning av kapsel samt projektering och byggande av en inkapslingsanläggning.

Kapslarna ska utformas och tillverkas så att de förblir täta under mycket lång tid i den miljö som kommer att råda i djupförvaret. De skall således inte korrodera sönder i det grundvatten som finns i berget eller klämmas sönder av de mekaniska påfrestningar de utsätts för i djupförvaret.

För att åstadkomma detta planeras kapseln bli utförd med en insats av t.ex. stål, som ger mekanisk hållfasthet, och en yttre del av koppar, som ger korrosionsskydd. Arbetet med att formulera dimensioneringsförutsättningarna för kapseln pågår. Härvid tas även hänsyn till kraven vid tillverkningen av kapseln, samt vid hanteringen i inkapslingsanläggningen, vid transporter och i djupförvaret.

Inkapslingen planeras, som redovisades i FUD-program 92, ske i en ny anläggning i anslutning till CLAB. I inkapslingsanläggningen tas bränslet emot ifrån CLABs lagringsbassänger. Efter det att bränsleelementen kontrollerats och torkats placeras de i kapseln. Innan locket på den inre stålbehållaren läggs på kommer luften i kapseln att ersättas med inert gas. Därefter försluts kopparkapseln genom att ett kopparlock sätts fast med elektronstrålesvetsning. Kraven på att denna svets blir tät och att tätheten kan kontrolleras är mycket höga.

Vid utformningen av inkapslingsanläggningen kommer stor vikt att läggas vid strålskydd för personalen och för omgivningen. Detta innebär bland annat att själva inkapslingen kommer att göras fjärrstyrt i kraftigt strålskärmade utrymmen, s k högaktiva celler. Även en stor del av hanteringen av kapslar kommer att ske fjärrstyrt. Erfarenheterna från CLAB och SFR, men även från olika utländska anläggningar kommer att utnyttjas.

4.1 KAPSELUTVECKLING

De viktigaste frågorna kring utvecklingen av kapseln gäller materialval, tillverkningsmetod, samt förslutnings- och kontrollteknik. Vidare har utformningen av insatsen betydelse för den praktiska hanteringen och för att undvika risken för kriticitet om vatten skulle fylla kapseln.

4.1.1 Materialval

Koppar har valts som kapselmateriel eftersom det inte korroderar i syrefritt vatten. Livslängden för kopparkapseln ur korrosionssynpunkt bestäms därför av mängden lösta korrosiva ämnen, främst sulfider, som kommer i kontakt med kapselytan. Konservativt bedöms största korrosionsdjupet på en kopparkapsel bli ca 5 mm på 100 000 år i det grundvatten som förväntas på djupet i svensk berggrund. Kunskapsläget inom korrosionsområdet för ren koppar bedöms som gott. Ifall ett legerat kopparmaterial senare kommer att användas krävs dock kompletterande korrosionsstudier.

Utöver korrosionsegenskaperna har kopparns kryp-egenskaper, kornstorlek och svetsbarhet betydelse. Dessa är till stor del beroende av tillverkningsmetod och val av kopparkvalitet. Som underlag för val av metod och kvalitet planeras verifierande undersökningar av dessa egenskaper.

4.1.2 Tillverkning

Under de senaste åren har prov genomförts av olika tillverkningsmetoder för kopparkapseln (och stålinsatsen). Proven har successivt ökat i skala och under sommaren 1995 har de första fullstora kapslarna framställts. Två metoder har provats – rullpressning och extrudering. I det förra fallet valsas och bockas två rörhalvor som sedan svetsas ihop med elektronstrålesvets, medan vid extruderingen ett fulllångt rör tillverkas direkt. Efter maskinbearbetning av kopparröret elektronstrålesvetsas i båda fallen en botten fast, innan stålinsatsen sätts i. Ytterligare tillverkningsprov planeras dels med de redan provade metoderna, dels eventuellt med någon annan metod, t ex pulvermetallurgisk tillverkning med het isostatisk pressning (HIP) eller elektrodeponering. Syftet är att visa att reproducerbara och kontrollerbara kapslar kan framställas i serieproduktion.

4.1.3 Förslutning

När kapseln fyllts med bränsle skall den förslutas och förslutningssvetsen kontrolleras. För förslutningen planeras elektronstrålesvetsning vid reducerat vacuum. En provserie av locksvetsning i full skala har genomförts med goda resultat. Innan slutligt val av svetsmetodik sker behöver dock anpassningar av lock- och svetsutformningen göras. Vidare behövs utvecklingsarbete för svetsutrustningen för att uppnå erforderlig kapacitet och tillförlitlighet.

Utvecklingsarbetet för icke-förstörande provning av svetsen pågår parallellt. Avgörande för kraven på denna utrustning är vilka defekter som måste kunna detekteras. Arbetet pågår för att definiera acceptabla defektstorlekar. De metoder som prövas för den icke-förstörande provningen är ultraljud (puls-eko-metod) och radiografi. För att förbättra upplösningen för dessa metoder utvecklas

olika typer av scanners. Hittillsvarande resultat tyder på att dessa metoder kommer att vara tillämpbara men att utvecklingsarbete återstår.

4.1.4 Fullskaleprov

Förslutningen och kontrollen av denna är avgörande för att erhålla en tät kapsel. Hittills har prov utförts i laboratoriemiljö. SKB överväger att som nästa steg genomföra en provserie med fullstora kapslar i en separat provanläggning. Denna planeras i så fall bli uppförd inom de närmaste åren, så att erfarenheter från proven kan beaktas vid detaljkonstruktionsarbetet för inkapslingsanläggningen.

4.1.5 Insats i kopparkapseln

För insatsen övervägs olika utformningar. Prov har genomförts med en insats i form av ett stålrör. För att få erforderlig marginal mot kriticitet (vid eventuell vattenfyllning av kapseln) i detta utförande krävs att tomrummet kring bränselelementen fylls med ett partikulärt material, t ex glaskulor. En alternativ utformning av insatsen studeras nu. Insatsen utförs som en gjuten behållare med kanaler för bränselelementen. Insatsen kan gutas i gjutstål, gjutjärn eller brons. Provtillverkning av en gjuten insats planeras. Med denna utformning kan kriticitetsproblematiken hanteras utan extra fyllning.

4.2 PROJEKTERING AV INKAPSLINGSANLÄGGNINGEN

Målet för pågående arbeten är att inkapslingsanläggningen skall vara färdig att leverera inkapslat bränsle till djupförvaret år 2008. Arbetet med projekteringen av inkapslingsanläggningen bedrivs stegvis i enlighet med etablerade rutiner vid byggande av kraftverk och liknande industrieanläggningar. I ett första steg har en förstudie genomförts och redovisats.

Arbetet befinner sig nu i förprojekteringskedet. Resultaten från detta skall ligga till grund för SKBs beslut om att söka tillstånd att uppföra anläggningen. Arbetet bedrivs så att tillståndsansökan skall kunna lämnas under 1997. I anslutning till ansökan skall även redovisas hur serietillverkning av kapslar skall ske, samt att kapseln kommer att uppfylla de krav som ställs för den långsiktiga säkerheten. Tidpunkten för ansökan blir därför beroende av i vilken takt anläggningsprojekteringen, kapselutvecklingen och säkerhetsanalysen för kapslar i djupförvaret utvecklas.

Som underlag för ansökan skall en miljökonsekvensbeskrivning (MKB) sammanställas. Diskussioner pågår med länsstyrelse, kommun och säkerhetsmyndigheter om vad som skall ingå i MKBn samt hur samråd i samband med MKB-arbetet skall ske.

5 DJUPFÖRVAR

Programmet för lokalisering och uppförande av djupförvaret har redovisats i FUD-program 92 och dess kompletterande redovisning. En modifiering av tidplanen har gjorts eftersom platsundersökningar ännu ej påbörjats. Under perioden 1996-2001 är arbetsuppgiften att ta fram underlag för en ansökan om att lokalisera och anlägga djupförvaret till en specifik plats. Det viktigaste närliggande målet är att påbörja platsundersökningar.

Arbetet med djupförvaret omfattar följande områden:

- underlag och planer för hur djupförvaret skall utformas, byggas, drivas och förslutas,
- lokaliseringsstudier (översiktsstudier, förstudier, platsundersökningar) som underlag till kommande val av plats för djupförvaret,
- underlag och planer för hur utvalda platser skall undersökas och utvärderas.

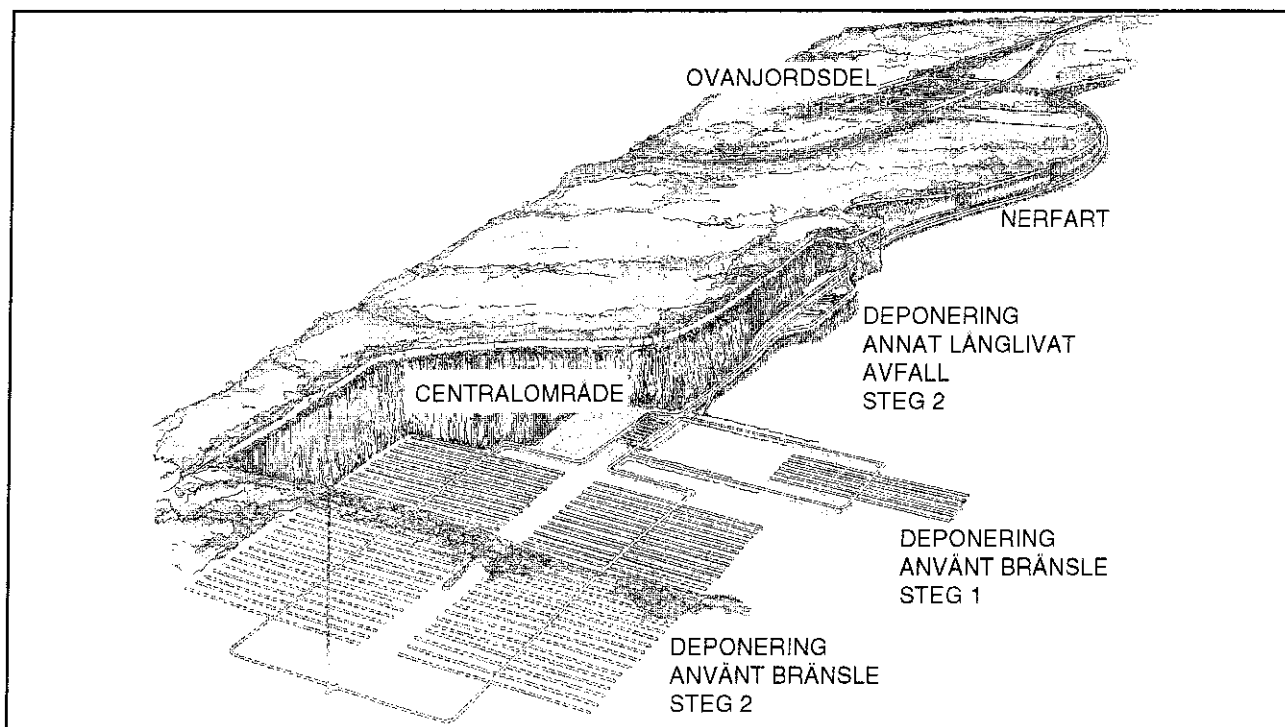
5.1 DJUPFÖRVARETS UTFORMNING

Ett djupförvar är en industri med anläggningar både under och ovan jord. Arbetena med djupförvarets utformning syftar till att uppnå en god funktion med hänsyn till säkerhet, miljö och teknik. Frågeställningar som utreds rör bl a för- och nackdelar med olika förvarskoncept, byggmetoder, teknik för deponering, förslutning och återtag, safeguard, arbetsmiljö samt effekter på samhälle och miljö.

SKB har påbörjat projekteringsarbetet genom att utarbeta generella anläggningsbeskrivningar. Dessa ger exempel på några möjliga sätt att utforma djupförvaret med dess byggnader, markområden, berggrum, tunnlar och schakt. De innehåller också krav på och principer för djupförvarets olika funktioner. En översikt av en möjlig utformning visas i Figur 2. Till stor del kan uppförande och drift av djupförvaret baseras på erfarenheter och beprövad teknik från kärntekniska anläggningar och berggrumsbyggen. Särskild uppmärksamhet ägnas bl a frågor om bergbyggets påverkan på berget runtomkring, metoder för tillverkning och applicering av bentonitbufferten samt material och teknik för återfyllnad och förslutning. Studier av bergkross som ballastmaterial i stället för sand, som var huvudalternativ i KBS-3, tyder på att krossat berg, eventuellt blandat med 10-20% bentonit, också kan ge den önskade funktionen vid återfyllnad av deponeringstunnlar m m.

En särskild utredning har gjorts av för- och nackdelar med olika förvarsdjup. Studien beaktar djup ned till 2000 meter. Slutsatsen är att de fördelar som kan uppnås med en djupare förläggning ej uppväger de växande svårigheter som uppstår med att bygga förvaret och att undersöka och karakterisera berget.

I det fortsatta arbetet med djupförvarets utformning ingår att anpassa utformningen till förhållandena på spe-



Figur 2. Principiell skiss av djupförvaret.

cifika platser i samband med att platsundersökningar kommer i gång. Ett omfattande teknikutveckling behöver vidare göras för att ta fram ändamålsenliga hanteringsutrustningar för att i deponeringstunnlarna överföra kapslar från transportbehållare och inplacera dem i deponeringshålen.

I Äspölaboratoriet kommer mycket av tekniken för hantering av buffertmaterial och kapslar att prövas. Djupförvarets effekter på samhälle och miljö utreds i samband med lokaliseringsstudierna. Hittills genomförda studier visar att det bör finnas goda möjligheter att anpassa djupförvarets utformning och drift så att effekterna på miljön blir små.

5.2 LOKALISERINGSSTUDIER

SKB avser att ta fram underlag för lokaliseringen av djupförvaret med hjälp av

- **förstudier** (i 5 till 10 kommuner), som skall identifiera intressanta områden för platsundersökningar och belysa vilka konsekvenser en djupförvarlokalisering skulle kunna ge i kommunen och regionen,
- **platsundersökningar** (på två platser), som skall ge underlag för att utforma ett djupförvar med hänsyn till platsens egenskaper och genomföra en miljökonsekvensbeskrivning med en analys av den långsiktiga

säkerheten. Platsundersökningar innebär bl a mätningar i djupa borrhål.

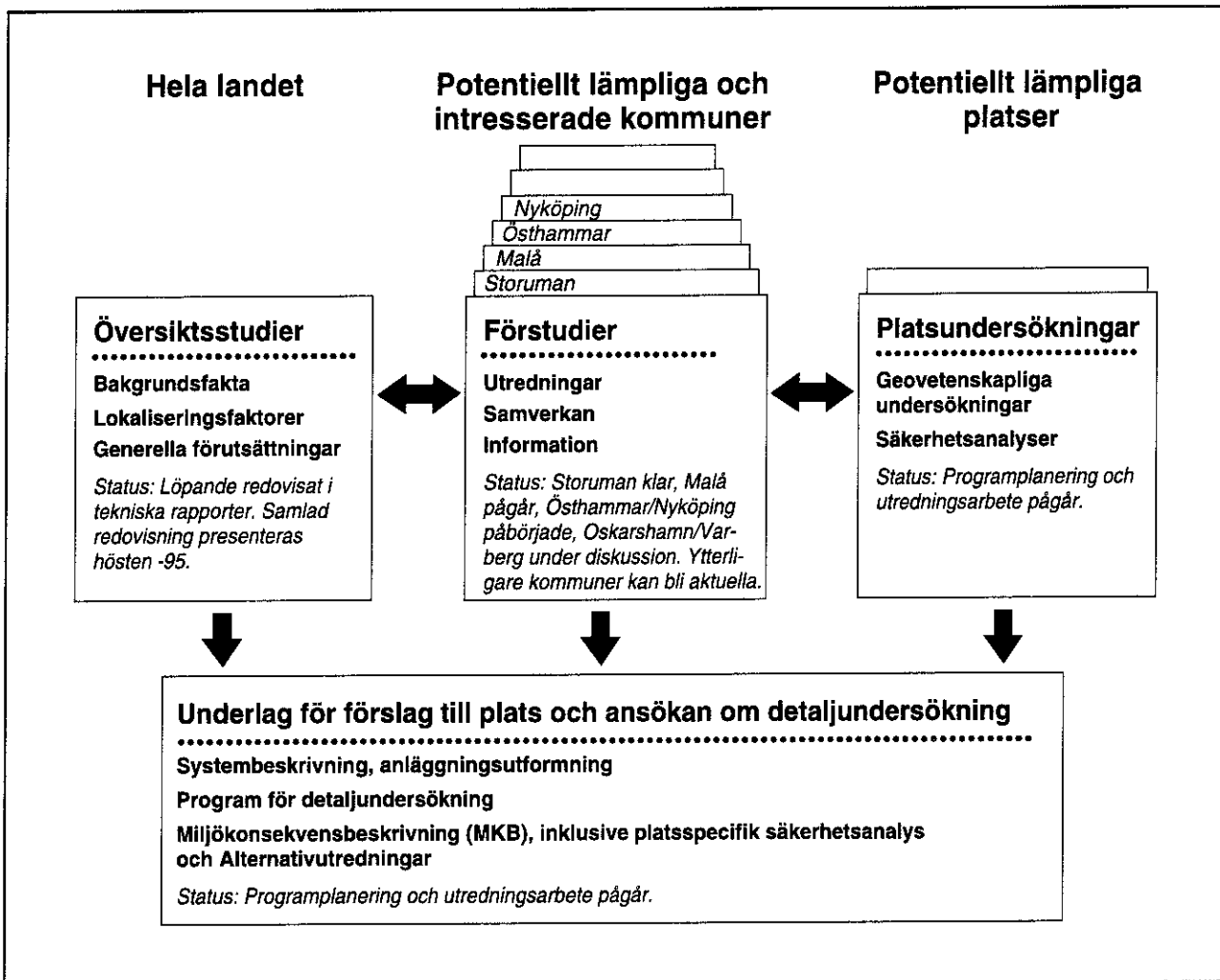
Detta arbete skall leda fram till förslag att genomföra en detaljundersökning och uppföra ett djupförvar på en plats.

Vägledande för lokaliseringsstudierna är de kriterier för säkerhet, teknik, mark och miljö samt samhälle som SKB angivit i FUD-program 92 och dess komplettering.

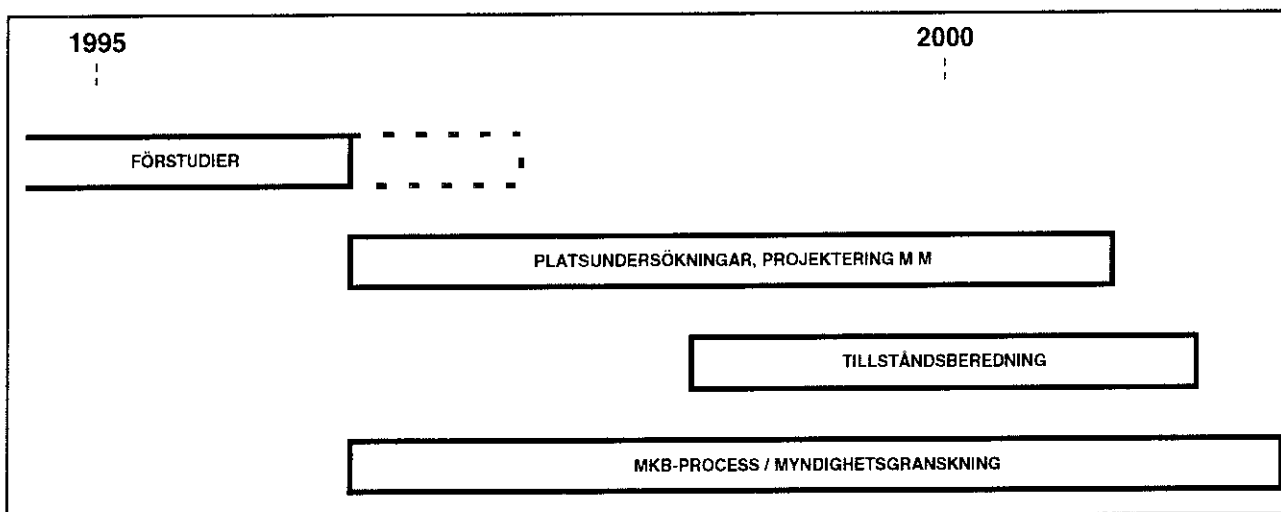
I diskussioner om lokalisering av djupförvaret framhålls ofta "att SKB måste hitta den bästa platsen", underförstått – ur säkerhetssynpunkt "bästa". Det finns emellertid inte någon objektivt sett bästa plats. Platsen skall uppfylla mycket höga säkerhetskrav. En helhetsbedömning av den långsiktiga säkerheten kräver tillgång till platsspecifika data om berggrundsförhållanden. Sådana data kan endast erhållas genom att omfattande undersökningar genomförs på platser vilka väljs på ett delvis ofullständigt underlag. När säkerheten sålunda har visats uppfyllt är det inte meningsfullt att tala om "ännu bättre platser". Detta har även framhållits av kärnkraftinspektionen i deras remissyttrande över FUD-program 92.

Huvudkomponenterna i arbetet och hur långt arbetet framskridit åskådliggörs schematiskt i Figur 3.

En tidplan för lokaliseringsstudierna visas i Figur 4. Den bygger på att förstudierna kan genomföras rationellt, sett ur teknisk synpunkt och att platsundersökningarna kan starta 1997. Tidpunkten för start av platsundersökningar framstår som tidskritisk för hela lokaliseringsprogrammet.



Figur 3. Huvudkomponenter i lokaliseringsarbetet samt genomförda och pågående aktiviteter.



Figur 4. Schema för etapp 1, lokalisering.

Ett stöd i lokaliseringsarbetet ger översiktsstudier som ger en allmän bakgrund av de grundläggande förutsättningarna över hela landet eller delar därav.

Utredningar inom ramen för översiktsstudierna har genomförts löpande sedan mitten av 1970-talet. En samlad redovisning publiceras i en separat rapport i anslutning till detta FUD-program 95. I rapporten redovisas och värderas ett flertal geovetenskapliga och samhällsliga faktorer som är eller kan vara av betydelse vid lokaliseringen av djupförvaret. Studien visar att de grundläggande förutsättningarna i fråga om mark- och berggrundsförhållanden kan finnas på många ställen i de flesta delar av landet. För identifiering av intressanta områden för platsundersökningar krävs en ingående genomgång av lokala faktorer som inte kan bedömas i Sverige-skalan utan bäst kan genomföras i förstudier på kommunnivå. En helhetsbedömning av framför allt den långsiktiga säkerheten kräver därefter tillgång till plats-specifika data om berggrunden.

Översiktsstudierna ger ingen direkt vägledning för att identifiera intressanta områden att placera ett djupförvar. Därtill är skalan alltför grov. Översiktsstudierna ger däremot visst underlag för att ange delar av landet som inte är av intresse för närmare lokaliseringsstudier. I första hand gäller detta, av geologiska skäl, fjällkedjan, Skåne och Gotland. Områden som ligger i ovanliga bergarter eller där det finns möjligheter till malmfyndigheter är inte heller av intresse. Detsamma gäller i lag skyddade områden som nationalparker, naturvårdsområden med mera. I övrigt används översiktsstudierna och bakomliggande material av SKB vid kontakter med tillkommande kommuner för att preliminärt bedöma för- och nackdelar ur lokaliseringssynpunkt och därmed intresset för SKBs del av att förstudier genomförs.

5.2.1 Förstudier

I förstudierna utreds möjligheterna till och konsekvenserna av en djupförvarslokalisering inom specifika kommuner. Studierna baseras huvudsakligen på befintligt material. SKB behöver inga formella tillstånd för att genomföra en förstudie. Uppläggningsen i praktiken är dock sådan att förstudierna sker i samförstånd mellan SKB och aktuell kommun. En förstudie tar cirka ett år att genomföra och den resulterar i ett omfattande utredningsmaterial som skall ge en bred belysning av de allmänna förutsättningarna för lokalisering av ett djupförvar till kommunen. De områden som med hänsyn till bl a berggrund och markförhållanden kan vara av intresse för platsundersökningar identifieras. Tekniska förutsättningar rörande anläggning och transporter utreds. Möjliga konsekvenser (positiva och negativa) för miljö, ekonomi, näringsliv och samhälle belyses.

En förstudie skall således ge ett brett faktaunderlag för såväl kommunen som SKB. Båda parter kan sedan var för sig ta ställning till om man är intresserad av att en platsundersökning påbörjas. Samma faktaunderlag blir tillgängligt för alla intresserade som därmed får möjlig-

het att påverka och framföra synpunkter långt innan några beslut behöver fattas om lokaliseringen av djupförvaret.

SKB har genomfört en förstudie i Storumans kommun. Slutrapporten publicerades i februari 1995. Förstudien visar att det kan finnas goda förutsättningar för ett djupförvar i kommunen. Kommunen anordnade en (lokal) folkomröstning den 17 september 1995 gällande frågan: "Skall SKB få fortsätta att söka slutförvaringsplats i Storumans kommun?" Resultatet blev ca 29% Ja-, ca 70% Nej- och ca 1% Blanka röster. Valdeltagandet var ca 73%. Detta innebär att SKB avslutar sitt arbete i Storuman.

En andra förstudie har pågått i Malå sedan vintern 1994. En sammanfattande lägesrapport publicerades i maj 1995. Slutrapporten beräknas vara klar under hösten 1995.

I en särskild utredning av översiktlig karaktär har SKB belyst förutsättningarna för förstudier av kommuner med kärnteknisk verksamhet (Varberg, Kävlinge, Oskarshamn, Nyköping, Östhammar). För samtliga kommuner utom Kävlinge visade utredningen på att det för SKBs del är intressant med förstudier. Sådana har nu påbörjats i samråd med Nyköping och Östhammars kommuner och diskuteras med Varbergs och Oskarshamns kommuner. Förstudier kan bli aktuella för ytterligare några kommuner.

Förstudierna har lett till omfattande diskussioner framför allt i de kommuner som berörts men även regionalt och på det nationella planet. SKB såväl som övriga berörda (myndigheter, politiker, allmänhet) har fått viktiga och värdefulla erfarenheter för det fortsatta arbetet. Svårigheter och möjligheter i lokaliseringsarbetet har tydliggjorts. Arbetet med förstudier har visat sig ta längre tid än vad SKB planerade i FUD-program 92, bl a därför att frågan redan i detta tidiga skede väcker mycket diskussion.

Lokaliseringen av djupförvaret är en nyckelfråga i kärnavfallsprogrammet. Förstudierna innebär att det konkreta lokaliseringsarbetet har kommit i gång på olika håll i landet. Ett fortsatt uthålligt och öppet lokaliseringsarbete krävs för att komma fram till en bra lösning som uppfyller kraven såväl när det gäller miljö och säkerhet som i fråga om lokal samverkan och förståelse.

5.2.2 Platsundersökningar

SKB planerar att genomföra platsundersökningar inom prioriterade områden i två av de kommuner där förstudier genomförts. Ett omfattande beslutsunderlag kommer att tas fram för respektive plats med hjälp av följande aktiviteter:

- Geovetenskapliga undersökningar i fält.
- Anläggningsutformning och projektering.
- Funktions- och säkerhetsanalyser.
- Analys av samhällsfrågor samt mark- och miljöfrågor.

- Framtagande av en miljökonsekvensbeskrivning i en MKB-process.
- Sammanställning av underlag för tillståndsprövning.

Inom alla dessa områden pågår nu förberedelser och planeringsinsatser. Till en del bygger arbetet vidare på det underlag som utarbetas i samband med förstudierna. De mest omfattande insatserna under platsundersökningsskedet kommer att vara de geovetenskapliga undersökningarna och de därpå baserade funktions- och säkerhetsanalyserna.

5.3 GEOVETENSKAPLIGA UNDER-SÖKNINGAR I FÄLT

Även om svensk berggrund generellt sett medger bra förhållanden för ett djupförvar så är det de lokala förhållandena i berggrunden som avgör en plats lämplighet. Innan platsundersökningar startar kommer ett undersökningsprogram att presenteras i en särskild rapport. Platsundersökningarna skall ge en bred geovetenskaplig förståelse av platsen och dess regionala omgivning. De syftar också till att ta fram geovetenskapliga data för en platsanpassad utformning av djupförvaret och en analys av djupförvarets långsiktiga säkerhet. De viktigaste faktorerna som behöver kartläggas i fältarbetena framgår av och diskuteras i kompletteringsrapporten till FUD-program 92 och även i föreliggande program.

Platsundersökningarna kommer att genomföras i flera steg. I ett inledande steg är syftet att verifiera förstudiens bedömning av ett områdes förutsättningar och att närmare identifiera till vilken del av området som undersökningarna skall koncentreras. Därefter kartläggs sprickzoner, bergartsgränser och andra geologiska förhållanden mot djupet med successivt ökande detaljeringsgrad. Mätningar och analyser av grundvattenkemi, grundvattenrörelser och bergspänningar ingår som en viktig del.

Anläggningsprojektering och säkerhetsanalyser genomförs i samverkan med undersökningarna. Förutsatt att undersökningarna i varje steg visar på lämpliga förhållanden fullföljs programmet fram till komplett underlag för en tillståndsansökan.

Metoder och teknik för geovetenskapliga undersökningar i fält har ingått som en viktig del i SKBs program sedan lång tid tillbaka. Utvecklingen påbörjades genom de så kallade typområdesundersökningarna under 1970- och 1980-talet på ett 10-tal platser i landet. Inför utformningen av undersökningsprogrammet har en förnyad genomgång av erfarenheterna av dessa undersökningar gjorts. Vidare skedde viktig metodutveckling i det internationella Stripa-projektet. En "generalrepetition" av undersökningsmetodiken kan sägas ske genom arbetena för Äspölaboratoriet (se avsnitt 8). Dessa innebär allsidig utprovning och samordnad utvärdering på en verklig plats och under realistiska förhållanden innan metoderna tillämpas för djupförvarsprojektet.

6 SÄKERHET

6.1 SÄKERHETSFUNCTIONER

Förvarets säkerhet beror på avfallets farlighet och dess tillgänglighet. Bedömningen av förvarets säkerhet påverkas av tiden dels genom att mängden farliga radionuklider minskar, dels genom att kvantifieringen av förvarets säkerhetsfunktioner minskar i precision med växande tid. Potentiella spridningsvägar för radionuklider till människan kan förändras med tiden men sådana förändringar kommer att ske i olika takt för de olika delarna i barriärsystemet. Erfarenheten visar att väsentliga förändringar i biosfären inträffar i tidskalan 100-1000 år. Den geologiska miljön djupt ner i den fenoskandiska urbergsskölden uppvisar däremot stabila förhållanden i perspektivet millioner år.

Möjligheterna att kvantifiera förvarets säkerhet (eller risken från förvaret) är följaktligen beroende av den tidsperiod man är intresserad av. Strålskyddsinstitutet har diskuterat tidsperspektivets inverkan på strålskyddsredovisningen och framhåller:

- Särskilt stor vikt skall ges åt att redovisa skyddet för perioden fram till förvarets förslutning och under de första tusen åren därefter, med särskild fokus på närboende människor.
- Individdos fram till nästa istid, dvs fram till ca 10 000 år, skall redovisas som bästa uppskattning med angivande av bedömda felgränser. Skyddet av naturen skall bedömas över samma tidsperiod.
- För perioden från nästa istid och framåt skall kvalitativa bedömningar göras av vad som kan hända med förvaret, inklusive överväganden som beaktar risken för förhöjda utsläpp.

För att uppnå önskad säkerhet vid byggandet av ett djupförvar, under driftskedet och under det långsiktiga förvarsskedet, ställs krav på hur förvaret och där ingående komponenter skall fungera. Den sammantagna funktionen av förvarets alla komponenter skall tillsammans ge en betryggande säkerhet i verksamheten.

För att åstadkomma en långsiktig säkerhet utformas förvarssystemet för att isolera det använda kärnbränslet från biosfären. Isoleringen åstadkommes genom att det använda kärnbränslet innesluts i täta kapslar som deponeras djupt i kristallin berggrund på en utvald förvarsplats. Förvaret har därutöver funktionen att hålla kvar radionukliderna och fördröja deras transport om isoleringen skulle brytas. Via platsval och lämplig anpassning av förvaret till förläggningsplatsen kan dessutom spridningsvägar och utspädningsförhållanden i biosfären påverkas så att eventuellt frigjorda radionuklider endast i mycket små mängder kan nå människan.

Materialen i förvaret har valts med hänsyn till att deras långsiktiga stabilitet och säkerhetsfunktion i förvaret skall kunna underbyggas med erfarenheter från naturen. Av samma skäl begränsas den termiska och den kemiska störning som förvaret tillåts ge i sin omgivning. Säker-

hetstänkandet för djupförvaret bygger på flerbarriärprincipen, d v s att säkerheten inte enbart får vara avhängig av att en ensam barriär skall fungera som planerat.

Säkerhetsfunktionerna kan delas upp på tre nivåer:

Nivå 1 – Isolering

Isoleringen gör att radionukliderna kan avklinga utan att komma i kontakt med människan och hennes omgivning.

Nivå 2 – Fördröjning

Om isoleringen bryts begränsas mängden radionuklider som kan nå biosfären genom:

- mycket långsam upplösning av det använda bränslet,
- sorption och mycket långsam transport av radionuklider i närområdet,
- sorption och långsam transport av radionuklider i berggrunden.

Nivå 3 – Recipientförhållanden

De spridningsvägar längs vilka eventuellt frigjorda radionuklider kan nå människan styrs i stor utsträckning av förhållandena där det djupa grundvattnet först når biosfären (utspädning, vattenanvändning, markanvändning och övrigt utnyttjande av naturresurser). En gynnsam

recipient innebär att stråldosen till människa och miljö begränsas. Recipienten och spridningsvägarna påverkas dock av biosfärens naturliga förändringar.

Säkerhetsfunktionerna enligt nivå 1 och 2 är de viktigaste och näst viktigaste. De uppnås genom krav på egenskaper och funktion hos både tekniska och naturliga barriärer samt på djupförvarets utformning. Inom de ramar som ges i övrigt eftersträvas även en god säkerhetsfunktion enligt nivå 3 genom lämplig förläggning och utformning av djupförvaret.

6.2 SÄKERHETSANALYSER

För att lokalisera, utforma och bygga de anläggningar och system som erfordras för att ta hand om radioaktivt avfall, och för att genomföra djupförvaringen, erfordras ett antal större beslut och tillstånd, se Tabell 1. I beslutsunderlaget ingår redovisningar av såväl den radiologiska säkerheten vid driften av anläggningarna eller systemen som av säkerheten vid den långsiktiga passiva djupförvaring som vidtar efter det att förvaret förslutits.

För redovisningen av säkerheten måste analyser genomföras av systemens och anläggningarnas säkerhet samt av de olika kandidatplatsernas potential till att utgöra goda förläggningsplatser. Systematiska metoder har utvecklats för att genomföra analyserna. Personalens och omgivningens radiologiska säkerhet under driftskedet kommer att utvärderas och redovisas enligt den prax-

Tabell 1. Kommande säkerhetsanalyser.

Underlag för beslut om tillstånd för:		
Säkerhetsanalys	Inkapslingsanläggning	Djupförvar
Inkapslingsanläggning SR-I	Lokalisering Uppförande	
Djupförvar SR-D		Lokalisering Uppförande, inkl detaljerade geovetenskapliga undersökningar samt viss byggnation
Inledande drift (Steg 1)	Start inkapsling – använt bränsle Inledande drift – steg 1	Inledande drift – Steg 1 – deponering, successiv utbyggnad deponeringstunnlar
Reguljär drift (Steg 2)	Kompletterande utbyggnad Reguljär drift – steg 2	Reguljär drift – Steg 2 – deponering, successiv utbyggnad deponeringstunnlar
Avveckling	Avveckling	Ev övervakad lagring, förslutning

is som utvecklats vid kärnkraftstationerna. Dessa analysmetoder och redovisningsprinciper har också tillämpats för Transportsystemet, CLAB och SFR.

Utvärderingen av ett djupförvars långsiktiga säkerhet följer i huvudsak samma principer som etablerats för driftsäkerheten. Eftersom ett djupförvar måste fungera i nära växelverkan med den naturliga geologiska miljön har det dock funnits behov att utveckla specifika metoder för att genomföra dessa analyser. Analysen av djupförvarets säkerhet måste göra prognoser över långa tider. Skiljelinjen mellan normala och onormala förhållanden kan då vara svår att identifiera.

Säkerhetsanalyser av hela förvarssystem eller analysen av funktionen hos enskilda barriärer eller delsystem följer en etablerad arbetsgång:

- Definition av analysens syfte.
- Definition av givna förutsättningar för analysen, dvs typer och mängder av radioaktivt avfall, förvarssystemet och dess dimensioner samt förvarets plats och miljö.
- Definition av analysens omfattning och avgränsningar, samt av säkerhetsmålen.
- Klarläggande av såväl de sannolika som de mindre sannolika eller osannolika förhållanden för vilka systemet/anläggningen skall analyseras (scenarier).
- Klarläggande av de tidsberoende processer som vid olika scenarier är väsentliga för förvarets avsedda funktion.
- Definition av beräkningsmodeller för att kvantifiera förvarets funktion och modellernas kopplingar, där så kan ske.
- Kvantifiering av förvarets funktion och väsentliga funktionsförändringar.
- Kvalitativ analys av viktiga men ej kvantifierbara processer eller händelser som kan inverka på förvarets funktion.
- Diskussion av osäkerheterna i kvalitativa och kvantitativa delanalyser och en bedömning av deras tillräcklighet med avseende på den totala analysens syfte.

Utvecklingen i Sverige av metodik för analyser av långsiktig säkerhet har pågått sedan slutet av 70-talet och pågår fortfarande i nära internationellt samarbete. Den generella metodutvecklingen har i huvudsak gällt scenariebegreppet och osäkerhetshandling/validitet. Specifik utveckling av modeller och dataunderlag för att kvantifiera de för säkerheten väsentliga processerna var en dominerande verksamhet under 80-talet.

I en International Collective Opinion ges en sammanfattning av kunskapsläget som resultatet av en granskning genomförd av experter inom OECD Nuclear Energy Agency, International Atomic Energy Agency, samt European Commission.

Man observerade där att

- säkerhetsanalysmetoder finns idag tillgängliga för att utvärdera potentiell radiologisk långtidspåver-

kan på människor och miljö från ett omsorgsfullt konstruerat förvarssystem för radioaktivt avfall,

- en lämplig användning av säkerhetsanalysmetoderna kan, tillsammans med tillräcklig information från en föreslagen lokaliseringsplats, ge ett tekniskt underlag för att bedöma om förvarssystemet erbjuder en, för nuvarande och framtida generationer, tillräcklig säkerhet.

Man noterade också att insamlandet och utvärderingen av data från föreslagna lokaliseringsplatser är ett huvudområde inom vilket vidare insatser måste göras, samt att metoderna för säkerhetsanalyser kan och kommer att vidareutvecklas som följd av pågående verksamhet. SKB delar den uppfattning som sålunda framfördes.

Den huvudsakliga metodutvecklingen under 90-talet inom SKB har koncentrerats på att ta fram praktiskt användbara metoder för att bestämma scenarier, genomföra modellberäkningar och granska resultatens giltighet och tillämplighet. Med hänsyn till att säkerhetsredovisningar skall göras vid ett flertal tillfällen har också diskussioner förts med myndigheterna om vad en säkerhetsrapport bör innehålla och hur den kan läggas upp. Detta arbete kommer att fortsätta och anpassas till de föreskrifter som är under utarbetande hos Kärnkraftinspektionen och Strålskyddsinstitutet.

I beskrivningen av kunskapsläget redovisas en principiell metodik för att genomföra säkerhetsanalyser. Den detaljerade redovisningen av metoder och av de numeriska verktyg som SKB har till sitt förfogande samt redovisningen av kvalitet och den tilltro SKB har till dessa modeller, samlats i en separat rapport betecknad SR 95. Denna har organiserats på ett sätt som kan vara en lämplig uppläggning (mall) för de kommande säkerhetsrapporterna. Den färdigställs i anslutning till detta program.

7 STÖDJANDE FORSKNING OCH UTVECKLING

Den stödjande FoU-verksamheten syftar till:

- att bygga upp en god förståelse för de fenomen och processer som kan ha betydelse för den långsiktiga säkerheten vid djupförvaring av radioaktivt avfall,
- att vidareutveckla modeller för väsentliga processer i förvaret,
- att inför de planerade platsundersökningarna, bygga upp erforderliga databaser och jämförelsematerial så att förvarets funktion och säkerhet skall kunna utvärderas.

I FUD-program 92 bedömde SKB att en tillräcklig förståelse och förmåga till kvantifiering av djupförvarets säkerhet förelåg för att SKB skulle kunna påbörja lokalisering och byggande av de anläggningar som erfordras för djupförvaringen. Den utveckling som genomförts

sedan dess har successivt fått en allt tydligare fokusering på

- metodik för praktisk platsundersökning,
- metodik för uppbyggnad och kontroll av barriärer,
- granskning av andra avfallsformer än använt kärnbränsle, samt på
- utvärdering av säkerhetens beroende av extremhändelser som istider, stora jordskalv, intrång etc.

Dessa förhållanden återspeglas både i redovisningens innehåll och i det fortsatta programmet.

Även om omfattningen av icke projektanknuten FoU-verksamhet fortsätter att minska innebär detta inte att den kan avvaras. Integrerade försök, praktiska prov och platsspecifika berggrundsundersökningar förväntas fortlöpande komma att identifiera frågeställningar och problem som kräver ytterligare fördjupning av kunskaper och databaser. Specifika behov av fördjupad förståelse kan också uppkomma av behovet att redovisa förvarets troliga utveckling utan ogynnsamma förenklingar, och behovet av att bättre kvantifiera säkerhetsmarginalerna i nuvarande utformningar.

SKB är angeläget att bibehålla en hög kompetens inom områden väsentliga för analys av säkerhet och genomförande av programmets nyckelområden.

7.1 ANVÄNT KÄRNBRÄNSLE

SKBs bränslestudier har pågått i drygt 15 år. Metoderna för att karakterisera det använda bränslet och mäta hur radioaktiva ämnen i bränslet frigörs i kontakt med vatten har genomgått en avsevärd utveckling och en omfattande databas har insamlats. Undersökningarnas tyngdpunkt har successivt ändrats från idealiserade experiment under "rena" förhållanden till större realism under förhållanden som förväntas i ett djupförvar.

Erfarenheterna från bränslestudierna har fortlöpande tillämpats för att definiera källtermen i olika konsekvensberäkningar. Fortfarande är modellerna för hur radioaktiva ämnen frigörs starkt förenklade med en grov överskattning av frigörelsehastigheten för de flesta radionuklider. SKBs fortsatta insatser inriktas på att söka utveckla en mera realistisk frigörelsemodell där hänsyn tas till både termodynamiska och kinetiska förhållanden.

7.2 BUFFERT OCH ÅTERFYLLNING

Kunskaperna om bentonit som buffertmaterial och för eventuell inblandning i återfyllnadsmaterialet har byggts upp genom studier i laboratorier och i fält. De bedöms nu tillräckliga för att motivera bentonitens användning i förvaret. En sammanfattande redovisning av data och egenskaper är under utarbetande.

De fortsatta studierna koncentreras på förbättring av kunskapsläget rörande bentonitens beteende under bevättningsförlopp, validering och vidareutveckling av be-

räkningsmodeller, samt tillverknings- och appliceringsteknik. Studier rörande växelverkan mellan bentonit och cement pågår liksom granskning av bentonitens inverkan på livsbetingelserna för mikrober.

Bentonitbuffertens funktion under bevättningskedet kommer att prövas i storskaliga experiment.

7.3 BERGGRUNDEN

Studierna av den svenska berggrundens lämplighet för djupförvaring har med Äspölaboratoriets tillkomst fokuserats på platsspecifika undersökningar. De processer som är viktiga för djupförvarets säkerhet har identifierats. Metoder har utvecklats och har prövats under fältmässiga förhållanden för att karakterisera berget och mäta de parametrar som behövs för att kvantifiera dessa processer.

Modeller har nu utvecklats till en nivå som möjliggör att med hjälp av beskrivningar och beräkningar avgränsa och minimera olika för säkerheten viktiga effekter på ett djupförvar. Ett fortlöpande arbete syftar till att jämföra konsekvenserna vid olika konceptuella förutsättningar. Strävan är också att så långt möjligt kunna validera de modeller som används. Detta kommer att fortsätta på grundval av platsspecifik datauppbyggnad både i Sverige och utomlands.

Den stödande geovetenskapliga FoU-verksamheten är nu inriktad på att utvidga och fördjupa kunskapen bl a vad gäller långsiktiga eller generella frågeställningar, såsom

- granskning av hur framtida glaciationer kan utvecklas och vilken deras effekt blir på ett djupförvar,
- granskning av tektoniska förhållanden i ett geologiskt tidsperspektiv som utgångspunkt för bedömningar av djupförvarets långsiktiga mekaniska stabilitet,
- hur beror resultat från platskarakterisering och modellering av undersökningsskalen,
- studier av grundvattenkemins naturliga variationer i tid och rum runt ett djupförvar
- att lära sig förstå hur grundvattnets kemiska sammansättning avspeglar resultaten av vattnets långsiktiga rörelse i berggrundens sprickor
- utveckling av databaser för berggrundens förhållanden på djupare nivåer än 1 000 m.

Insatser därutöver kommer att inriktas på de frågeställningar som kan aktualiseras vid de kommande platsundersökningarna.

7.4 KEMI

De processer som är viktiga för djupförvarets funktion och för de radioaktiva ämnenas frigörelse, transport och fördröjning har identifierats. Termodynamiska databaser har utvecklats för att ge stöd för antaganden om kemisk

speciering, löslighet etc. Laboratiormätningar har gett databaser dels för olika ämnens diffusion i buffert och bergmatris, dels för dessa ämnens sorption i närområdets material eller i berget.

Numeriska modeller har utvecklats för att kvantifiera frigörelse, transport och fördröjning. Delvis har dessa modeller byggts upp för att vara konservativt förenklade, vilket innebär att om en process inte kan kvantifieras i detalj, skall beräkningarna inte underskatta de för förväret negativa konsekvenserna av processen.

Det pågående arbetet är i stor utsträckning inriktat på att ytterligare granska olika fenomen som skulle kunna negativt påverka de barriärer eller processer som är viktiga för att förväret skall fungera som avsett. Exempel är mikroorganismers effekt på kapsel, grundvattenkemi och transport, bildning av kolloider och komplex etc som skulle kunna påskynda transporten av de radioaktiva ämnena i berget. Andra insatser granskar grunderna till sorptionsbegreppet för att så långt möjligt kunna validera transportmodellerna.

7.5 BIOSEFÄR

Genom studier av spridningen av radioaktiva ämnen och andra föroreningar i biosfären har en avsevärd databas och modelleringsförmåga byggts upp inom området. En ofrånkomlig osäkerhet i prediktioner över långa tider uppkommer på grund av att biosfärens förändringar sker i en långt snabbare takt än förändringarna i berggrunden och i djupförvarets närhet.

Detta innebär att dosberäkningar endast har en relativt "kort" (kanske 1000-årig) relevans. Detta begränsar användbarheten av begreppet "dos" som index på förvarets påverkan i människans miljö. Dosberäkningar används dock ofta över längre tider som ett sätt att vikta samman tänkbar påverkan av utsläpp av flera olika radioaktiva ämnen.

Insatserna inom biosfärsområdet inriktas idag på att etablera och pröva metodik för att fastställa de för dosberäkningarna väsentliga egenskaperna i platsspecifika biosfärer. I första hand planeras kartläggning av områden som kan vara recipienter för sådant grundvatten som kommer från förvarsdjup. Andra insatser inriktas på att begränsa osäkerheterna genom att på basis av platsspecifika eller regionala förhållanden söka avgränsa de möjliga förändringar som kan komma att inträffa med tiden. Omfattande internationellt samarbete pågår för att jämföra olika sätt att modellera biosfärsspridningen, och att prognosera den framtida utvecklingen.

7.6 NATURLIGA ANALOGIER

De processer som inverkar på säkerheten i ett djupförvar är kända och kan prövas i laboratorier eller studeras genom exempel i naturen. De senare ger möjligheter att undersöka långsamma förlopp som pågår under mycket lång tid.

Genom observationer och mätningar av utvalda naturliga system (naturliga analogier) har man under de senaste tio åren kunnat studera och pröva flertalet av de processer som förväntas påverka funktionen hos barriärerna och därmed säkerheten hos ett slutförvar. Exempel på sådana processer är mineralomvandlingar, medfällning, korrosion, upplösningsförlopp, matrisdiffusion, etc samt förekomsten av bl a organiskt material, mikrober och kolloider. Analogierna ger därutöver möjlighet att studera samverkan av flera processer med en interdisciplinär ansats som är svår att åstadkomma i ett laboratorium.

Studierna av analogier till djupförvarets funktion kommer att fortsätta för att pröva modellens validitet och för att underbygga prognoser över långa tider.

7.7 ANNAT AVFALL

Förutom det använda kärnbränslet kommer även andra avfallskategorier att tillföras djupförväret. För att inte komplicera framförallt de kemiska förhållandena kommer dessa avfall att lagras i separata utrymmen. En genomgång av mängder, innehåll av aktivitet och kemisk form har gjorts som en förstudie av hur avfallet skall förpackas och förvaras. Arbetet fortsätter nu i en andra fas med analyser av väsentliga funktioner och möjliga scenarier som förberedelse för säkerhetsanalyser, beslut om förvarsutformning och projektering.

8 ÄSPÖLABORATORIET

Äspölaboratoriet utgör en viktig del av SKBs arbete med att utforma ett djupförvar och att utveckla och pröva metoder för att undersöka en lämplig plats. Under hösten 1986 påbörjade SKB fältarbeten för lokalisering av det underjordiska laboratoriet till Simpevarpsområdet i Oskarshamns kommun. Anläggningsarbeten inleddes hösten 1990. Undermarksdelen är utformad som en tunnel från Simpevarpshalvön till södra delen av Äspö. På Äspö går den 3600 m långa tunneln i två varv ner till ett djup av 450 m. De sista 400 metrarna bröts ut med en tunnelborrningsmaskin (TBM) med 5 meters diameter. Den första delen av tunneln är utbruten genom sprängning. Anläggningsarbetena slutfördes under 1995.

Under förundersökningsskedet, 1986-1990, genomfördes omfattande undersökningar av de naturliga förhållandena i berggrunden dels från markytan och dels från ett omfattande system av borrhål. Förutsägelser gjordes med avseende på de geologiska, geohydrologiska, geokemiska m fl förhållanden som skulle observeras under anläggningsskedet. Under anläggningsskedet, 1990-1995, genomfördes omfattande undersökningar och försök parallellt med drivningen av tunneln. Driftsskedet inleddes 1995. I detta program anges inriktningen på de undersökningar och försök som planeras bli genomförda under driftsskedet.

Verksamheten vid Äspölaboratoriet har också rönt stort internationellt intresse. Avtal om deltagande finns med nio utländska organisationer.

8.1 MÅL

Ett av de grundläggande motiven för SKBs beslut att anlägga Äspölaboratoriet var att skapa en möjlighet till forskning, utveckling och demonstration i en realistisk och ostörd bergmiljö ned till det djup som planeras för ett framtida djupförvar.

Vid planering och utformning av verksamheten vid Äspölaboratoriet under driftsskedet prioriteras projekt som syftar till att

- öka den vetenskapliga förståelsen om djupförvarets säkerhetsmarginaler,
- utveckla och pröva teknik som minskar kostnader och förenklar slutförvarskonceptet med bibehållen hög kvalitet och säkerhetsnivå,
- demonstrera den teknik som kommer att användas vid deponering av använt kärnbränsle och annat långlivat avfall.

8.2 RESULTAT

Vid starten av arbetena på Äspö definierades bl a följande etappmål:

- Demonstrera att undersökningar på markytan och i borrhål ger tillräckliga data om väsentliga säkerhetsrelaterade egenskaper hos berget på förvarsnivå.
- Vidareutveckla och verifiera de metoder som behövs vid karakterisering av berget vid detaljundersökning av en plats.

Det första av dessa etappmål är uppfyllt i och med slutförandet av anläggningsskedet och att de undersökningar och forskningsarbeten som gjorts i samband därmed slutrapporteras under 1995 och början av 1996. Resultaten i stort visar att de metoder som finns tillgängliga för att undersöka berg är väl ägnade att ta fram den kunskap och de data om berggrunden på en specifik plats som behövs för att anlägga ett djupförvar och visa att detta uppfyller säkerhetskraven.

Det andra etappmålet har delvis uppfyllts i och med de arbeten som genomförts parallellt med anläggningsarbetet. Inom ramen för detta etappmål pågår ytterligare arbeten som avslutas under de närmaste åren bl a:

- Detaljerade undersökningar av den störda zonen runt sprängda och borrhåls tunnlar (ZEDEX-projektet).

- Utveckling av ett interaktivt datorsystem (Rock Visualization System) för tolkning och presentation av mätdata samt design av förvaret.

8.3 PROGRAM FÖR 1996-2001

Flera projekt vid Äspö syftar till att utvärdera användbarhet och tillförlitlighet hos olika modeller som beskriver bergets barriärfunktion samt till att utveckla och pröva metoder för bestämning av parametrar som ingår i modellerna. Studier genomförs även av den störning som byggande och drift av ett förvar innebär på berget för att säkerställa att störningen inte har en negativ inverkan på förvarets långsiktiga säkerhet.

Följande pågående och planerade arbeten berör dessa frågor:

- Detaljerad karakterisering av sprickor för att ta fram modeller för och data på sprickegenskaper som kan hanteras i radionuklidtransportberäkningar.
- Fält- och laboratorieexperiment för att fördjupa kunskaperna om bergets förmåga att kvarhålla eller fördröja transport av radionuklider i sprickigt berg (Tracer Retention Understanding Experiments).
- Fält- och laboratorieexperiment för att studera hur och med vilken hastighet det syre som finns i förvaret vid förslutning förbrukas genom reaktioner med berget (REX – Redoxförsök i detaljskala).
- Experiment i ett specialutvecklat borrhålslaboratorium (CHEMLAB) som möjliggör genomförande av kemiska försök under förvarsliknande förhållanden med avseende på grundvattensammansättning och tryck. Försöken genomförs för att bekräfta de modeller och kontrollera de konstanter som används för att beskriva radionuklidens upplösning i grundvatten, inverkan av radiolys, bränslekorrosion, sorption på mineralytor, diffusion i bergmatrisen, diffusion i återfyllnadsmaterial, uttransport ur en skadad kapsel och transport i en enskild bergspricka.
- Samordnad utvärdering av hydrogeologiska grundvattenflödesmodeller och hydrogeokemiska blandningsmodeller.
- Fält- och laboratorieexperiment för att undersöka i vilken utsträckning avgasning av grundvatten vid låga tryck påverkar mätningar av hydrauliska egenskaper i tunnlar och borrhål belägna under jord.

En väsentlig del av arbetet med utvärdering av modeller utförs i Äspölaboratoriets internationella arbetsgrupp

för modellering (Äspö Task Force on Groundwater Flow and Transport of Solutes).

Äspölaboratoriet ger också möjlighet att i full skala pröva, undersöka och demonstrera olika komponenter i djupförvarssystemet som har betydelse för långtidssäkerheten. Det är också viktigt att visa att hög kvalitet kan erhållas i utformning, byggande och drift av ett djupförvar.

Följande pågående och planerade arbeten berör dessa frågor:

- Utforma, bygga och pröva funktionen hos ett prototypförvar i Äspölaboratoriet. En fullskaleprototyp av djupförvaret byggs för att simulera samtliga steg i deponeringssekvensen i en realistisk miljö. Den ger även möjlighet att observera ett simulerat förvar under flera år innan det blir dags att deponera den första kapseln i djupförvaret.
- Prov av bentonitbuffertens funktion i djupförvarsmiljö under lång tid (upp till 20 år) för att prova modeller och bekräfta resultat från laboratorieexperiment.
- Prov av olika tunnelfyllnadsmaterials hydrauliska och mekaniska egenskaper samt utveckling och prov av teknik för packning och återtag av tunnelfyllnad.
- Vidareutveckling av statistisk metodik för att uppskatta den del av deponeringstunnlarnas längd som kan användas för utplacering av kapslar baserat på geologisk, bergmekanisk, hydrogeologisk och annan information från olika undersökningsskeden.
- Provning av injekteringsmetodik för att verifiera kunskaper och teknik om injektering/förstärkning av större transmissiva diskontinuiteter och starkt vattenförande diskontinuiteter med måttlig mäktighet och utbredning.

9 ALTERNATIVA METODER

Djup geologisk förvaring av långlivat radioaktivt avfall är allmänt accepterad bland internationell expertis som en bra metod som kan genomföras på ett sätt som tillgodoser fundamentala etiska och miljömässiga krav. Samtidigt som forsknings- och utvecklingsarbetet på direkt slutförvaring av använt kärnbränsle fullföljs genom byggande av anläggningar för inkapsling och ett första steg för djupförvaring finns det dock skäl att avdela vissa resurser åt uppföljning av alternativa metoder till SKBs huvudlinje. Detta är också i linje med kärntekniklagens krav på ett allsidigt program. Internationellt drivs FoU-arbete på såväl alternativa behandlingsmetoder för det använda bränslet som på alternativa slutförvaringsmetoder för långlivat avfall. Genom SKBs väl utvecklade internationella samarbetsnät säkras en bred insyn i de

huvudprogram som pågår i andra länder. För vissa specifika utvecklingslinjer med en möjlig tillämpning på längre sikt är det dock motiverat med en begränsad egen insats. Detta skapar en inhemsk kompetens på området som medger att Sverige får insyn i de bredare program som genomförs i andra länder. I regeringsbeslutet över FUD-program 92 angav regeringen att SKB i det nu aktuella programmet skulle redovisa sin bedömning av de alternativa metoder som är aktuella.

Största intresset i den vetenskapliga och i den allmänna debatten kring alternativa metoder till geologisk djupförvaring har under senare år ägnats transmutation av de långlivade radioaktiva ämnena som finns i avfallet. Denna teknik kräver upparbetning av det använda kärnbränslet och separation av de långlivade radioaktiva ämnena från resten av avfallet. Med hjälp av kärnreaktioner omvandlas sedan de långlivade nukliderna till kortlivade eller icke-radioaktiva ämnen. Man kan konstatera att i dag finns det tekniska möjligheter till transmutation av en betydande del av det plutonium som bildats i använt kärnbränsle. För vissa andra långlivade ämnen finns möjligheterna till transmutation (i begränsad omfattning) genom en måttlig utveckling. Utveckling av föreslagna mer avancerade metoder för transmutation till industriell skala kräver emellertid i vissa avseenden ett tekniskt genombrott samt lång tids arbete och stora resurser. Enbart det faktum att transmutation fordrar upparbetning gör att kostnaderna för en avfallshantering baserad på transmutation av långlivade nuklider vid dagens kostnadsnivå blir väsentligt mycket högre än för direkt deponering av icke-upparbetat kärnbränsle.

Det är svårt att finna något ekonomiskt motiv eller kortsiktigt säkerhetsmässigt motiv för transmutation vid en jämförelse med idag industriellt etablerade system för hantering av använt kärnbränsle (direktdeponering och upparbetning/förglasning samt slutförvaring). Bedömningen är snarare att stråldoser till personalen i samband med hantering och behandling kommer att bli väsentligt större för transmutationsfallet. Även om utvecklingen av transmutation blir framgångsrik kommer det ändå att finnas ett behov av djupförvaring av sådant långlivat avfall som oundvikligen uppkommer från den relativt komplicerade behandlingsprocessen.

Andra alternativ till geologisk förvaring ägnas vare sig i Sverige eller internationellt något direkt intresse utan dessa har mer eller mindre avfärdats. Fortsatt övervakad lagring tills vidare är enda undantaget. Sådan kan genomföras på många sätt och för det svenska kärnbränslet sker det nu i CLAB. Övervakad lagring fyller emellertid ej det långsiktiga mål som kommit till uttryck i lagens krav på slutförvaring på ett säkert sätt.

Bland olika alternativa metoder för geologisk förvaring finns för svenskt vidkommande ett visst uttalat intresse från några håll för förvaring i djupa borrhål. SKB bedriver en begränsad uppföljande verksamhet med denna inriktning. Bedömningen i nuläget är att det krävs ett mycket omfattande och långvarigt forskningsarbete innan man kan etablera ett djupförvar baserat på djupa borrhål.

10 RIVNING AV KÄRNTEKNISKA ANLÄGGNINGAR

När ett kärnkraftverk eller annan kärnteknisk anläggning rivs är delar av det radioaktivt nedsmutsat. Rivningen måste därför ske på ett kontrollerat sätt och det radioaktiva materialet tas om hand och slutdeponeras som radioaktivt avfall. På olika håll i världen pågår nu rivningsarbeten. I första hand är det små forsknings- och prototypreaktorer som rivs. På senare år har även direkta rivningsarbeten på stora kraftreaktorer påbörjats, t ex i USA och Tyskland.

Internationellt förekommer ett omfattande samarbete inom rivningsområdet för att utbyta erfarenheter. SKB är aktivt engagerat i ett sådant samarbetsprogram inom OECD/NEA. I detta ingår för närvarande 29 anläggningar i tio länder. Inom programmet gjordes för några år sedan en genomgripande analys av status och utvecklingsbehov inom rivningsområdet. Därvid identifierades inget område som kräver grundläggande utvecklingsinsatser. Däremot noterades att det finns behov av att överföra utprovade metoder till industriell skala. Detta

sker nu i anslutning till olika projekt och arbetet utförs av industriella företag. Av detta skäl har bland annat EU dragit ner på sitt forskningsprogram inom området.

I Sverige har inget utvecklingsarbete som direkt berör rivningsområdet genomförts. Däremot föreligger omfattande erfarenheter från olika reparations- och underhållsarbeten som är direkt tillämpbara på rivning, t ex den genomgripande dekontamineringen och ombyggnaden av Oskarshamn 1, samt ånggeneratorbytena i Ringhals 2 och 3. Teoretiska studier av tekniken och kostnaderna för att riva de svenska kärnkraftverken har genomförts vid några tillfällen. Den senaste 1994. Dessa studier skall bland annat ge underlag för avgiftsberäkningar.

För den kommande sexårsperioden planeras inga omfattande insatser inom rivningsområdet. Arbetet koncentreras på uppföljning av verksamheten utomlands samt av större svenska reparationsarbeten. Vidare kommer prov att utföras med hantering och eventuellt deponering av större komponenter som erhållits vid tidigare ombyggnadsarbeten. I slutet av perioden kan det bli aktuellt att påbörja projekteringen av slutförvaret för rivningsavfall.

1 INLEDNING, BAKGRUND

1.1 RIKTLINJER FÖR AVFALLSHANTERINGEN

Målet för avfallshanteringen är att på ett säkert sätt ta hand om alla radioaktiva restprodukter som uppkommer vid de svenska kärnkraftverken och andra kärntekniska anläggningar i landet. Vidare skall man på ett säkert sätt ta om hand allt övrigt radioaktivt avfall som uppkommer i Sverige.

I SKBs FoU-program 86 /1-1/ presenterades följande allmänna riktlinjer:

- De radioaktiva restprodukterna skall omhändertas i Sverige.
- Det använda kärnbränslet skall mellanlagras och slutförvaras utan upparbetning.
- Tekniska system och anläggningar skall uppfylla högt ställda krav på säkerhet och strålskydd samt tillgodose svenska myndighetskrav.
- Systemen för avfallshandtering skall utformas så att kraven på kontroll av klyvbart material kan tillgodoses.
- Avfallsfrågan skall till alla väsentliga delar lösas av den generation som utnyttjar elproduktionen från kärnkraftverken.
- Beslut om den definitiva utformningen av slutförvaret för använt kärnbränsle skall fattas först omkring år 2000 för att kunna baseras på ett brett kunskapsunderlag.
- Erforderliga tekniska lösningar skall utarbetas inom landet samtidigt som tillgänglig utländsk kunskap skall inhämtas.
- Myndigheternas löpande granskning och direktiv avseende kärnkraftföretagens handläggning av avfallsfrågan skall vara vägledande för arbetets bedrivande.
- Verksamheten skall bedrivas öppet och med god insyn från samhällets sida.

Dessa allmänna riktlinjer föranledde inga speciella kommentarer från de granskande instansernas sida. De upprepades i FoU-program 89 /1-2/ och diskuterades och ifrågasattes då vad gäller det använda kärnbränslet i vissa stycken av kärnbränslenämnden. Nämndens synpunkter föranledde även vissa uttalanden i regeringens beslut över FoU-program 89. Detta föranledde ytterligare överväganden från SKBs sida och i FUD-program 92 /1-3/ redovisades följande slutsats:

En bred politisk och allmän opinion torde vara överens om följande grundläggande principer för kärnavfallshandtering i Sverige:

- Sverige har redan kärnavfall och detta måste tas om hand på ett säkert sätt inom landet.
- Framtida säkerhet bör baseras på en förvaringsmetod som inte förutsätter tillsyn och/eller underhåll då detta skulle innebära att generation efter generation långt in i framtiden måste behålla kunskapen om avfallet och ha vilja, förmåga och resurser att sköta sådan tillsyn och underhåll. Kunskapen om framtidens samhälle är för begränsad för att bygga den långsiktiga säkerheten på denna förutsättning.
- Det finns skäl att, allt medan man arbetar konkret och målmedvetet mot att förverkliga en slutförvaring av allt kärnbränsle, så långt möjligt bibehålla handlingsfriheten med tanke på om alternativa och på något sätt bättre eller enklare lösningar kommer fram eller på grund av att man t ex omvärderar nuvarande bedömning angående återutnyttjande (upparbetning) av en del av de klyvbara ämnena (U, Pu) i bränslet.
- De nordiska strålskyddsmyndigheterna har formulerat följande princip: *Bördan på framtida generationer skall begränsas genom att man vid lämplig tidpunkt genomför en säker deponering som inte beror av långsiktig institutionell kontroll eller förbättrande åtgärder som en nödvändig säkerhetsfaktor /1-4/.* Samma krav finns också formulerat på internationell nivå /1-5/ och har allmänt accepterats som en grundprincip av alla länder med kärnkraft.

Vad gäller driftavfallet från kärnkraftverken och en del annat avfall från sjukvård, forskning m m finns redan anläggningar och system i drift som fyller de krav som följer av de allmänna riktlinjerna.

De synpunkter som framförts med avseende på värdet av bevarande av handlingsfrihet har beaktats i nu löpande FUD-program.

1.2 GÄLLANDE LAGSTIFTNING M M

Kärnkraftverksägarnas skyldigheter med avseende på hantering och slutförvaring av radioaktivt avfall regleras i lagen /1-6/ om kärnteknisk verksamhet, i förordningen om kärnteknisk verksamhet /1-7/ och i lagen /1-11/ om finansiering av framtida utgifter för använt kärnbränsle m m samt i vissa tillstånd och riktlinjer som regeringen utfärdar.

Bestämmelserna och riktlinjerna innebär i korthet att ägarna av kärnkraftreaktorer skall svara för

- att vidta de åtgärder som behövs för att hantera och slutförvara uppkommet kärnavfall på ett säkert sätt och för att avveckla och riva kärnkraftverken och tillhörande anläggningar,
- den allsidiga forsknings- och utvecklingsverksamhet som behövs för att genomföra dessa åtgärder inklusive studier av alternativa hanterings- och förvaringsmetoder,
- att var tredje år från och med 1986 upprätta ett program för forskning och utveckling och övriga åtgärder samt därvid redovisa uppnådda forskningsresultat,
- att täcka samtliga kostnader för hantering och slutförvaring av kärnavfallet.

1.3 HISTORIK

Forskning rörande hantering och slutförvaring av radioaktivt avfall startade i större omfattning i Sverige i samband med inrättandet av Programrådet för radioaktivt avfall (Prav) år 1975. Rådet inrättades på förslag av AKA-utredningen /1-8/. Forskningen intensifierades i samband med tillkomsten av den s k "villkorlagen" 1976/77. Härvid startades KBS-projektet av kärnkraftföretagen. Projektarbetet knöts administrativt till SKB. Projektet tog fram två slutförvaringsmetoder KBS-1 för förglasat högaktivt avfall från upparbetning (1977) /1-9/ och KBS-2 för slutförvaring av använt icke upparbetat kärnbränsle (1978) /1-10/.

KBS-1-rapporten utgjorde underlag för ansökningar om laddningstillstånd för reaktorerna Ringhals 3 och 4 samt Forsmark 1 och 2. Regeringen beviljade tillstånd för laddning 1979/80.

I samband med tillkomsten av finansieringslagen /1-11/ avskaffades Prav och i stället inrättades Nämnden för Använt Kärnbränsle (NAK), sedermera Statens Kärnbränslenämnd (SKN). Denna myndighet hade bl a till uppgift att granska och övervaka kraftföretagens (SKBs) verksamhet inom avfallsområdet. Från 1 juli 1992 har SKNs uppgifter överförts på Statens Kärnkraftinspektion.

År 1983 presenterade SKB en ny rapport om slutförvaring av använt kärnbränsle. Rapporten baserades på samma metod som beskrivs i KBS-2, men den nya rapporten, KBS-3, byggde på ett väsentligt breddat och fördjupat kunskapsunderlag /1-12/.

KBS-3-rapporten utgjorde underlag för laddningstillstånd för reaktorerna Forsmark 3 och Oskarshamn 3. Regeringen beviljade sådana tillstånd enligt kärntekniklagen /1-6/ i juni 1984. Som grund för tillståndet låg även ett forskningsprogram /1-13/ som utarbetats av SKB i februari 1984. Sedermera har även drifttillstånd för Bar-

seback 2, Ringhals 3 och 4 och Forsmark 1 och 2 överförts till att baseras på KBS-3.

I september 1992 presenterade SKB det tredje forskningsprogrammet enligt kärntekniklagen /1-3/. Resultaten från SKBs forskningsarbeten rapporteras fortlöpande i SKBs tekniska rapporter. Årliga sammanfattningar ingår i SKB Annual Report /1-14, 15, 16/. En mer kortfattad och lättillgänglig årlig rapportering sker även i SKBs årsredovisning – Verksamheten – som ges en bred spridning.

1.4 FUD-PROGRAM 92 – REMISSBEHANDLING

Efter att FUD-program 92 inlämnats till SKI i september 1992 sändes programmet på remiss till ett stort antal institutioner i Sverige. På basis av de inkomna synpunkterna och egna överväganden sammanställde SKI en granskningsrapport till regeringen i mars 1993 /1-17/. KASAM lämnade i juni 1993 en rapport med eget yttrande över FUD-programmet till regeringen /1-18/. Regeringens beslut med anledning av FUD-program 92 meddelades i december 1993 /1-19/. I detta ställdes krav på komplettering av vissa punkter. SKB lämnade en sådan komplettering i augusti 1994 /1-20/. Denna kompletteringsrapport remissbehandlades på samma sätt som huvudrapporten /1-21/ och ett regeringsbeslut meddelades i maj 1995 /1-22/.

SKB har så långt möjligt beaktat inkomna kommentarer till FUD-program 92 inklusive kompletteringsrapport i föreliggande FUD-program 95.

1.5 AVFALL FRÅN DET SVENSKA KÄRNKRAFTPROGRAMMET

Radioaktivt avfall från det svenska kärnkraftsprogrammet har varierande form och aktivitetssinnehåll, alltifrån praktiskt taget inaktivt sopavfall till använt bränsle, som har mycket högt aktivitetssinnehåll. Olika avfallsformer ställer därför olika krav på hantering och slutförvaring. Ur hanteringssynpunkt är det praktiskt att indela avfallet i grupperna lågaktivt, medelaktivt och högaktivt avfall.

Lågaktivt avfall kan hanteras och lagras i enkla förpackningar utan särskilda skyddsåtgärder i övrigt. Medelaktivt avfall måste strålskärmas för säker hantering. Högaktivt avfall kräver utöver strålskärning även kylning under en viss tid för att kunna lagras säkert.

Ur slutförvaringssynpunkt är livslängden hos de ingående radioaktiva ämnena av stor betydelse. Man skiljer mellan avfall med kort och lång livslängd.

Det kortlivade avfallet innehåller huvudsakligen radionuklider med kortare halveringstid än 30 år, dvs det har avklingat till ofarlig nivå inom några hundra år.

Långlivat avfall förblir radioaktivt under tusentals år eller mer och kräver en mer kvalificerad slutförvaring.

Tabell 1-1. Avfallsmängder i svenska kärnavfallsprogrammet.

Produkt	Huvudsakligt ursprung	Enhet	Antal enheter	Volym i slutlager m ³
Använt bränsle		kapslar	4 500	13 500
Alfa-kontaminerat avfall	Låg- och medelaktivt avfall från Studsvik	fat och kokiller	2 800	1 700
Hårdkomponenter	Reaktordelar	kokiller	1 400	9 600
Låg- och medelaktivt avfall	Driftavfall från kärnkraftverk och behandlingsanläggningar	fat och kokiller	55 900	91 000
Rivningsavfall	Från rivning av kärnkraftverk och behandlingsanläggningar	främst 20 m ³ ISO-cont	8 500	156 400
Total mängd ca			73 100	272 200

Avfallet från kärnkraftverken brukar med hänsyn till den fortsatta hanteringen delas in i följande grupper:

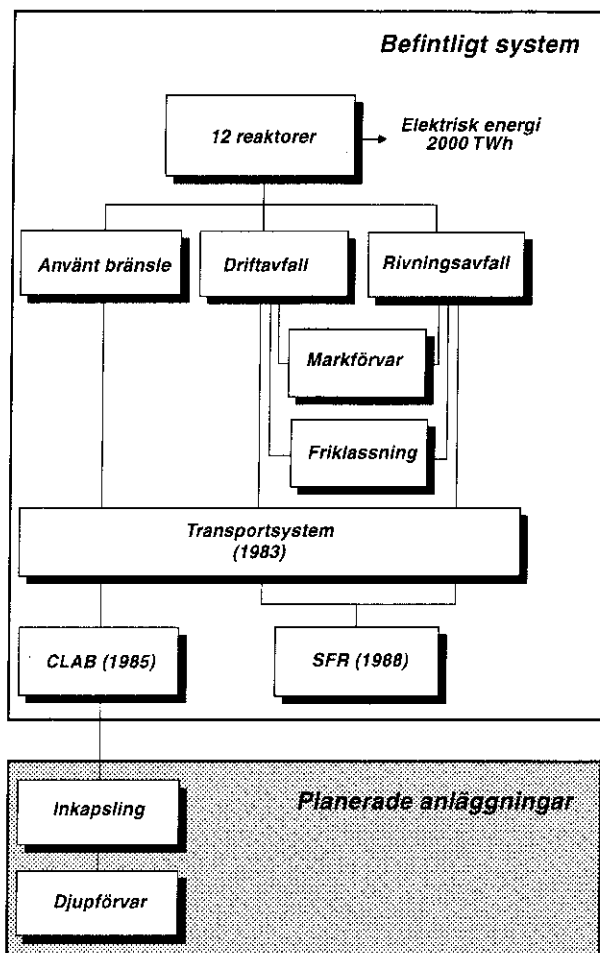
- Använt bränsle.
- Driftavfall.
- Hårdkomponenter och interna delar.
- Rivningsavfall.

De olika avfallstyperna beskrevs utförligt i FUD-program 92 /1-3/ och sedan dess har inga väsentliga förändringar inträffat vad gäller de olika avfallstyperna som måste tas omhand i Sverige. Aktuella avfallsmängder för olika kategorier avfall framgår i detalj av rapporten PLAN 95 /1-23/ och sammanfattas i Tabell 1-1.

1.6 EXISTERANDE SYSTEM FÖR HANTERING AV RADIOAKTIVT AVFALL FRÅN KÄRNKRAFTVERKEN

För hantering och slutförvaring av kärnkraftavfallet krävs planering, uppförande och drift av ett flertal anläggningar och system. Figur 1-1 ger en översikt av de olika delarna i det planerade svenska avfallshanteringssystemet. Dessa beskrivs utförligt i den årliga redovisningen av kostnaderna för att ta hand om kärnkraftens radioaktiva restprodukter, PLAN 95, som kraftföretagen genom SKB lämnat /1-23/.

Utformningen av systemet baseras på följande grundläggande principer:



Figur 1-1. Översikt av det svenska avfallshanteringssystemet.

- Kortlivat avfall skall deponeras snarast efter att det uppkommit.
- Använt bränsle mellanlagras i 30-40 år innan det placeras i djupförvar. Därigenom begränsas värmeutvecklingen i djupförvaret.
- Övrigt långlivat avfall deponeras i anslutning till den slutliga deponeringen av använt bränsle.

Väsentliga delar av avfallshanteringssystemet är redan i drift, nämligen det centrala lagret för använt bränsle, CLAB, slutförvaret för radioaktivt driftavfall, SFR, och transportsystemet.

SFR har varit i drift sedan 1988 och har idag kapacitet att ta emot 60 000 m³ radioaktivt driftavfall och kan byggas ut för ytterligare behov. Utbyggnad planeras även ske för deponering av kortlivat låg- och medelaktivt rivningsavfall från kärntekniska anläggningar.

CLAB har varit i drift sedan 1985 och har idag kapacitet att lagra 5000 ton (uranvikt) använt kärnbränsle och denna kapacitet planeras utbyggd till ca 8000 ton i början av nästa decennium.

Transportsystemet är baserat på sjötransport och består av ett fartyg, M/S Sigyn, ett antal transportbehållare och terminalfordon. Systemet har varit i drift sedan 1982 och har successivt byggts ut och kompletterats till nuvarande funktion och kapacitet.

De befintliga anläggningarna och systemen drivs med mycket hög tillgänglighet och god tillförlitlighet, har en mycket god arbetsmiljö och obetydliga miljöeffekter i omgivningen.

Det som återstår att bygga av erforderligt system är en inkapslingsanläggning för använt bränsle, ett djupförvar för långlivat avfall samt erforderliga kompletteringar av transportsystemet för att frakta inkapslat kärnbränsle och annat avfall till djupförvaret. För dessa systemdelar pågår ett omfattande arbete, som syftar till att bestämma en lämplig utformning och plats. Planerna för detta beskrivs utförligt i denna rapport.

I åtgärderna för att ta hand om kärnkraftens radioaktiva restprodukter ingår även att riva kärnkraftverken och övriga anläggningar, när dessa har tagits ur drift, samt att slutförvara avfallet från rivningen, se kapitel 14.

2 MÅL FÖR PROGRAMMET

2.1 MÅL

I FUD-program 92 /2-1/ redovisade SKB sin och därmed berörd kraftindustris planering för genomförande av djupförvaring av det långlivade radioaktiva avfall inklusive det använda kärnbränsle som uppkommer vid driften av de svenska kärnkraftverken. Planeringen innebär i korthet:

Målet är att, med uppfyllande av alla miljö- och säkerhetskrav, år 2008 påbörja deponering i ett djupförvar av en mindre del (ca 800 ton) av det använda kärnbränslet.

För detta krävs en inkapslingsanläggning och ett djupförvar. Vidare behövs kompletteringar av befintligt transportsystem för att frakta det inkapslade bränslet från inkapslingsanläggningen till djupförvaret. Inriktningen är inkapsling i kopparkapslar som fyller de säkerhetskrav som djupförvaret ställer. Djupförvaringen avses genomförd enligt det s k KBS 3-konceptet eller närliggande optimerat utförande på ca 500 m djup i urberg.

Inkapslingsanläggningen utförs som en tillbyggnad av CLAB. Djupförvaret lokaliseras till en lämplig plats i Sverige som dels ger möjlighet att uppfylla de högt ställda säkerhetskraven och dels ger möjlighet att utföra erforderliga arbeten i samförstånd med berörd kommun och berörd befolkning.

Säkerhets- och strålskyddsfrågorna kommer grundligt att penetreras och redovisas innan beslut om väsentliga bindande åtgärder tas.

Samtidigt som arbetet med denna huvuduppgift genomförs kommer SKB att följa och i begränsad omfattning stödja FoU på alternativa utvecklingslinjer som huvudsakligen dock drivs i andra länder. Denna inriktning av SKBs program som utförligt redovisades i FUD-program 92 är i samklang med kärntekniklagens /2-2/ bestämmelser om ett allsidigt program.

Den i FUD-program 92 redovisade inriktningen har i allt väsentligt accepterats av myndigheter och regering.

SKI /2-3/ uttalar att:

...FUD-program 92 uppfyller de grundkrav som ställs på ett program för forskning och utveckling enligt 12 § lagen om kärnteknisk verksamhet med avseende på mål-inriktning, bredd och djup.

SKI kan godta att de fortsatta FUD-insatserna huvudsakligen inriktas på en metod av typ KBS-3. ... Ett KBS-

3-liknande förvar bör också kunna utformas så att det kan erbjuda en rimlig avvägning mellan övergivbarhet, återtagbarhet och oåtkomlighet för det klyvbara materialet.

SKI anser det vara en god handlingsstrategi att bygga ut djupförvaret i etapper ...

KASAM /2-4/ uttalar att:

KASAM tillstyrker att SKB inriktar sin FUD-verksamhet under perioden 1993-1998 på en förvaring i demonstrationsskala med återtagningsmöjlighet som det första steget i sluthantering av det använda kärnbränslet,

att detta steg omfattar 5-10% av hela den beräknade bränslemängden från det svenska reaktorprogrammet, och

att KBS-3 är ett rimligt val för demonstrationsdeponeringen.

Regeringen uttalar i regeringsbeslutet 1993-12-16 /2-5/ angående SKBs FUD-program 92 att:

Regeringen finner i likhet med SKI att FUD-program 92 uppfyller de anspråk som ställs i 12 § kärntekniklagen.

Regeringen konstaterar att ... arbetet med att deponera använt kärnbränsle och kärnavfall i ett djupförvar planeras bli utfört i två faser, nämligen demonstrationsdeponering och slutförvaring.

Regeringen finner i likhet med SKI och KASAM att ändringen av programmet har betydande fördelar även om slutförvarets långtidsegenskaper inte kan demonstreras. Regeringen vill särskilt framhålla att även om KBS 3-metoden skulle vara ett rimligt val för demonstrationsdeponering bör SKB inte binda sig för någon specifik hanterings- och förvaringsmetod innan en samlad och ingående analys av tillhörande säkerhets- och strålskyddsfrågor har redovisats.

Den fortsatta planeringen av de åtgärder som krävs för att genomföra den beslutade huvudlinjen kräver ett antal följdbeslut gällande miljökonsekvensbeskrivningar, lokalisering, säkerhetsredovisning, investering, tillstånd enl olika lagar osv. För dessa beslut behövs underlag i olika omfattning som kommer fram genom det pågående arbetet. De kan givetvis även föranleda omprövning och förändringar av vald inriktning.

Detta FUD-program redovisar den aktuella planeringen i detalj för den närmaste sex-årsperioden och översiktligt för framtida, nödvändiga åtgärder.

2.2 PRINCIPIELL UTFORMNING AV DJUPFÖRVARET

Nedanstående beskrivning av djupförvaret följer de principer som utarbetats i KBS 3 /2-6/ och FUD-program 92 /2-1/ samt SKBs planrapport /2-7/. En närmare beskrivning av hur anläggningarna kan komma att utformas finns i "Kortfattad preliminär anläggningsbeskrivning," /2-8/.

Förvaret förläggs på ca 500 m djup beroende på förhållandena på den valda platsen. Från tunnlar på detta djup borrar deponeringshål i vilka kopparkapslar med använt kärnbränsle placeras och omges av bentonitlera – se Figur 2-1. Återfyllning av tunnlar kan ske med en blandning av bentonit och kvartssand eller annat lämpligt material. Vid den slutliga utformningen och anpassningen till vald plats kan närliggande optimerade varianter till det här beskrivna principutförandet bli aktuella.

Djupförvaret byggs ut i två steg. I det första steget deponeras ca 400 kapslar (ca 800 ton uranvikt) med använt kärnbränsle. Denna inledande driftsperiod planeras starta tidigast år 2008 och pågå i ungefär 5 år, varefter erfarenheterna utvärderas. Det finns då även möjlighet att återta kapslarna om man av någon anledning skulle finna det nödvändigt.

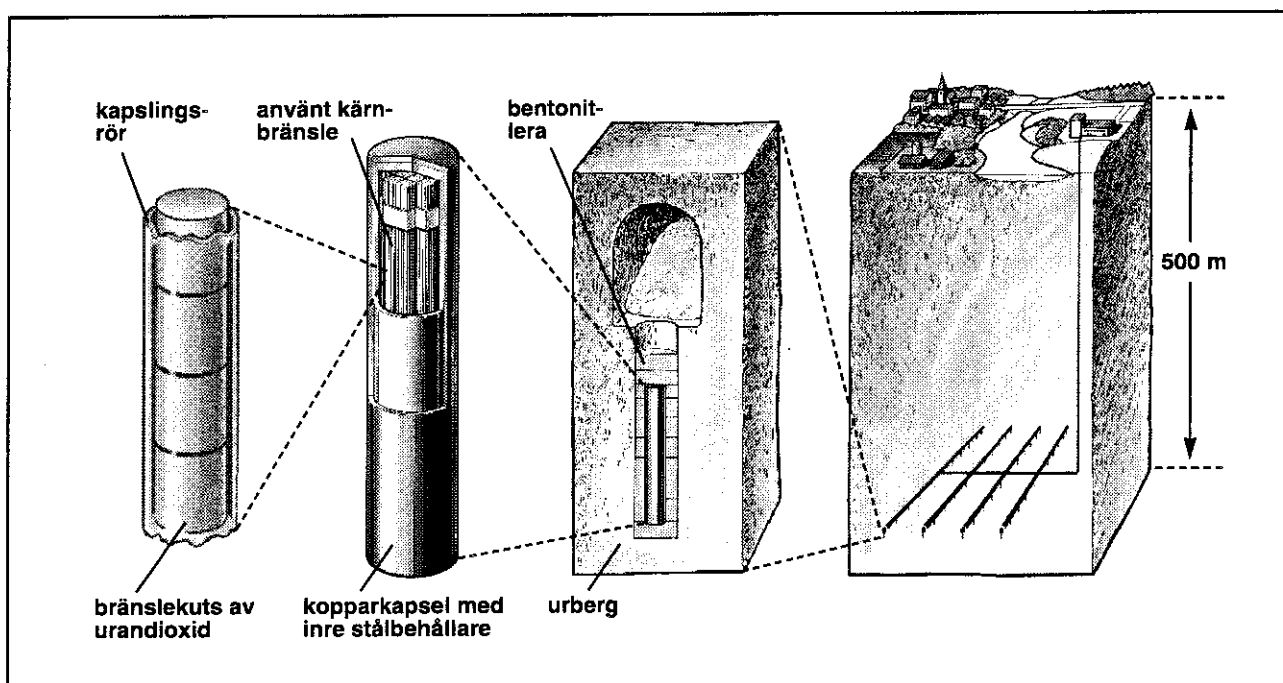
Om utvärderingen ger resultatet att fortsatt deponering är lämpligt och acceptabelt – vilket är vår bedömning –

byggs hela förvaret ut (steg 2) och verksamheten fortsätter till dess att allt avfall deponerats, vilket bedöms inträffa omkring år 2040. Den totala mängden använt kärnbränsle som då deponerats beräknas till ca 8 000 ton, vilket är den mängd som uppkommer från det nuvarande svenska kärnkraftsprogrammet fram till år 2010.

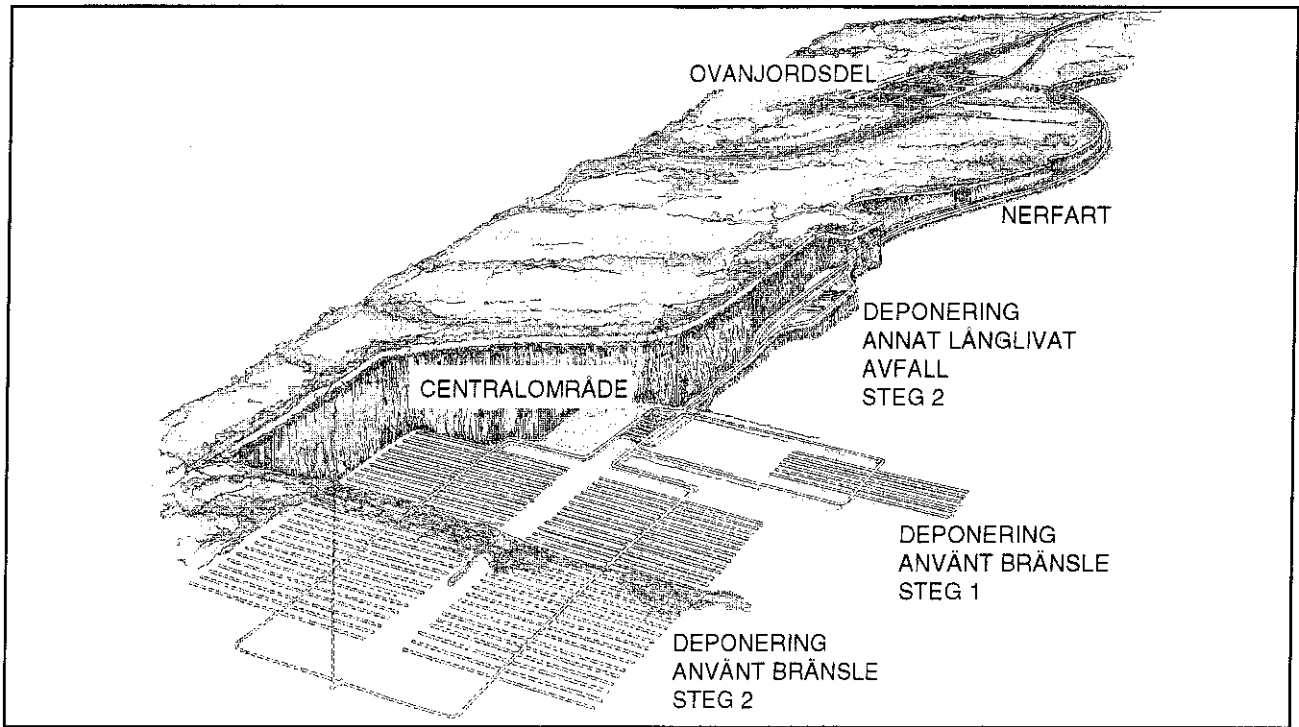
Under steg 2 planeras deponering även av "annat radioaktivt avfall" i en särskild del av djupförvaret. Detta avfall liknar det som idag deponeras i Slutförvaret för radioaktivt driftavfall, SFR, i Forsmark. Det innehåller dock mer långlivade radioaktiva ämnen än SFR-avfallet. Totalt beräknas mängden sådant annat avfall till 25 000 m³.

Avfallet deponeras i tre separata förvarsområden; område för kapslar som deponeras under den inledande driften (steg 1), område för kapslar som deponeras under den reguljära driften (steg 2) samt område för annat avfall (steg 2). Totalt upptar dessa förvarsområden en yta på ca 1 km². Figur 2-2 visar en principskiss över djupförvarets utformning.

Om utvärderingen däremot leder till beslut att avbryta deponeringen efter den inledande driften (steg 1) finns det även möjlighet att återta de deponerade kapslarna och placera dem i mellanlager.



Figur 2-1. Djupförvar enligt KBS-3-konceptet.



Figur 2-2. *Principiell skiss av djupförvaret.*

3 STEGVIS UTVECKLING OCH UTBYGGNAD

I modern miljölagstiftning har införts krav på miljökonsekvensbeskrivning – MKB – av den anläggning eller det system för vilket man söker tillstånd. I förarbetena till lagen sägs att MKB även skall belysa konsekvenserna av alternativa metoder/utföranden inklusive ett s k nollalternativ innebärande att den anläggning eller det system för vilket tillstånd sökes ej kommer till stånd. I debatten om det svenska kärnavfallsprogrammet hävdas ibland att "ingen metod har ännu valts", "SKB har för bråttom (med lokalisering av djupförvaret) – det finns ännu ingen metod utarbetad" o s v. En historisk återblick ger dock vid handen att en stegvis avgränsning av de studerade metoderna för behandling och slutförvaring av det högaktiva avfallet har skett. Vidare har val mellan olika principiella metoder genomförts. Dessa avgränsningar och val har presenterats och diskuterats i de återkommande programmen och genomförts efter bred remissbehandling och omfattande offentlig granskning. Genom denna process har huvudinriktningen av det svenska kärnavfallsprogrammet utvecklats i samförstånd mellan industri, myndigheter och regering. I anslutning till kommande lokaliseringsansökningar för de planerade anläggningarna kommer alternativ att redovisas och prövas till den metod, den utformning och den lokalisering som ansökan gäller.

I detta kapitel redovisas kortfattat de viktigaste stegen i redan träffade metodval. Vidare diskuteras innebörden av ett nollalternativ samt planerade steg för etappvis utbyggnad av djupförvaret. Slutligen diskuteras MKB och MKB-processen.

3.1 METODVAL

3.1.1 Djupförvaring i urberg

Utvecklingen av det svenska systemet för hantering av använt kärnbränsle inleddes på 1970-talet med den s k Aka-utredningen vilken publicerades våren 1976 /3-1/. Utredningens viktigaste förslag var att man skulle bygga dels ett mellanlager för använt kärnbränsle och dels ett slutförvar i berg för låg- och medelaktivt avfall. Anläggningarna borde enligt förslaget i första hand lokaliseras till något av kärnkraftverken eller Studsvik och transporterna baseras på sjötransport. Förslagen ledde till anläggning av CLAB och SFR samt uppbyggnad av ett sjötransportsystem under 1980-talet.

Aka-utredningen föreslog också bl a att

- man skulle inleda studier av möjligheten att bygga en svensk upparbetningsanläggning,
- man skulle påbörja studier av direkt slutförvaring av det använda kärnbränslet utan föregående upparbetning,

- slutlig förvaring av radioaktivt avfall bör ske i urberg,
- geologiska studier av platser lämpliga för slutförvaring bör inledas.

Aka-utredningen bidrog även till att kärnavfallsfrågan kom i fokus av den politiska debatten. Den borgerliga regering som bildades efter valet 1976 föreslog riksdagen att man skulle stifta en villkorslag för att få starta nya kärnkraftblock och en sådan lag antogs av riksdagen 1977 /3-2/. Lagen innebar att ansvaret för att driva utvecklingen på kärnavfallsområdet de facto överfördes på kärnkraftverkens ägare. Dessa startade det s k KBS-projektet som genomfördes inom SKB.

Villkorlagen krävde att man skulle visa "hur och var en helt säker slutlig förvaring av det vid upparbetning erhållna högaktiva avfallet kan ske, eller" ... "hur och var en helt säker slutlig förvaring av använt, ej upparbetat kärnbränsle kan ske".

Aka-utredningen och villkorlagen innebar tillsammans att det arbetet fokuserades på djupförvaring av det högaktiva avfallet i svenskt urberg. Denna linje accepterades av industrin, myndigheterna och regeringen som sedermera prövade de olika rapporterna från KBS-projektet. Ett första steg i metodvalet skede därmed de facto.

Efter det att genomförbarheten av en säker slutförvaring enligt KBS-koncepten accepterades har alternativa koncept för behandling och slutförvaring av det använda kärnbränslet åter diskuterats bl a i forskningsprogrammet 1986 sid 17-18 i del I /3-3/. Där fastslås att "forskningsprogrammet har således inriktats mot slutmålet att slutförvaringen av det använda kärnbränslet **skall ske djupt ned i svensk berggrund.**" I och med att myndigheterna och regeringen funnit att detta program "...uppfyller de anspråk som ställs i 12§ kärntekniklagen..." och att "...arbetet i huvudsak bör bedrivas i enlighet med den inriktning som anges i programmet" /3-19/ har man också accepterat denna utgångspunkt. Denna har även gällt för senare program som granskats och i huvudsak accepterats av myndigheter och regering.

Även internationellt är geologisk djupförvaring av det högaktiva avfallet det alternativ som förordas och prioriteras av industri och myndigheter i alla större kärnkraftländer. Detta framgår inte minst av de s k "Collective Opinions" som utarbetats av OECD/NEAs kärnavfallskommitté /3-17, 18/.

3.1.2 Direkt slutförvaring utan upparbetning

Inom ramen för KBS-projektet studerades två alternativa vägar för behandling av det använda kärnbränslet – upp-

arbetning och direkt slutförvaring utan upparbetning. Den första rapporten från projektet, KBS-1, behandlade slutförvaring av förglasat avfall från upparbetning /3-5/. Tillsammans med avtal om upparbetning av använt bränsle hos det franska företaget Cogema var denna rapport underlag för tillstånden att starta reaktorerna Ringhals 3 och 4 samt Forsmark 1 och 2. Tillstånd att starta dessa reaktorer erhöles successivt efter folkomröstningen om kärnkraft som hölls våren 1980.

Riksdagsbeslutet om användningen av kärnkraft efter nämnda folkomröstning begränsade antalet reaktorer till de 12 block som då var i drift eller under byggnad. Vidare beslutades att dessa block skulle avvecklas senast 2010. Under 1980-talet skedde dessutom världen över en stark minskning i utbyggnaden av kärnkraftverk vilket bidrog till att uranpriset minskade kraftigt. Sammantaget medförde detta att det ej längre fanns några tekniska och ekonomiska motiv för upparbetning av det använda kärnbränslet. Vidare blev det politiska motståndet mot upparbetning och återanvändning av plutonium allt starkare m h t risken för att plutonium skulle kunna avledas till militära ändamål. Svensk kraftindustri beslöt därför redan tidigt att ansökan om starttillstånd för de två sista reaktorerna i det av riksdagen godkända programmet skulle baseras på slutförvaring av bränslet utan upparbetning. KBS-3 rapporten togs fram och presenterades 1983 och med denna som grund beviljades starttillståndet för Forsmark 3 och Oskarshamn 3 i juni 1984.

Sedan dessa starttillstånd erhållits överfördes även övriga reaktorer som erhållit startgodkännande enligt villkorlagen till att få sina tillstånd baserade på KBS-3 rapporten /3-6/. Detta gjorde det möjligt för kraftföretagen och SKB att överföra rätten till upparbetning enligt avtalen med Cogema på andra kunder hos Cogema och därmed avveckla vidare upparbetning av bränsle från de svenska kärnkraftverken. Detta innebar att arbetet koncentrerades på direkt slutförvaring utan föregående upparbetning. Ett andra metodval var därmed avklarat och accepterat av industri, myndigheter och regering. Detta har också noterats i redovisade FoU-program, som accepterats av regeringen.

3.1.3 Alternativ för geologisk djupförvaring

Djupförvaring av använt kärnbränsle i svenskt urberg kan utformas och utföras på flera olika sätt. Kärntekniklagen /3-4/ kräver att det forskningprogram som genomförs skall vara allsidigt i bl a den meningen att olika alternativ studeras. Utifrån de grundläggande principerna för djupförvaringen (se vidare i kapitel 4) kan man välja mellan många utformningar. Under 1980- och 1990-talets lopp har ett antal sådana studerats, några mycket ingående. Bland utföranden som studerades kan nämnas WP-Cave, Djupa Hål, Långa tunnlar, Medellånga tunnlar /3-7, 3-8, 3-9, 3-10/. FUD-program 92 /3-11/ gav en sammanfattande redovisning av dessa studier och drog slutsatsen att "utformning enligt KBS-3

behålls 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". Den principiella utformningen har redan beskrivits i avsnitt 2.2. Inriktningen har i allt väsentligt accepterats av myndigheterna och regeringen.

Internationellt har de principer och konceptuella lösningar som beskrevs i KBS-rapporterna vunnit stor respekt och erkännande. Jämfört med andra alternativ har således KBS-3 utformningen visat sig mycket bra för den typ av berggrund som finns i Sverige och många andra länder. Ansvariga organisationer i länder med liknande berggrund, t ex Finland och Kanada, är således inriktade på utformningar som är mycket nära lika KBS-3.

3.2 NOLLALTERNATIV

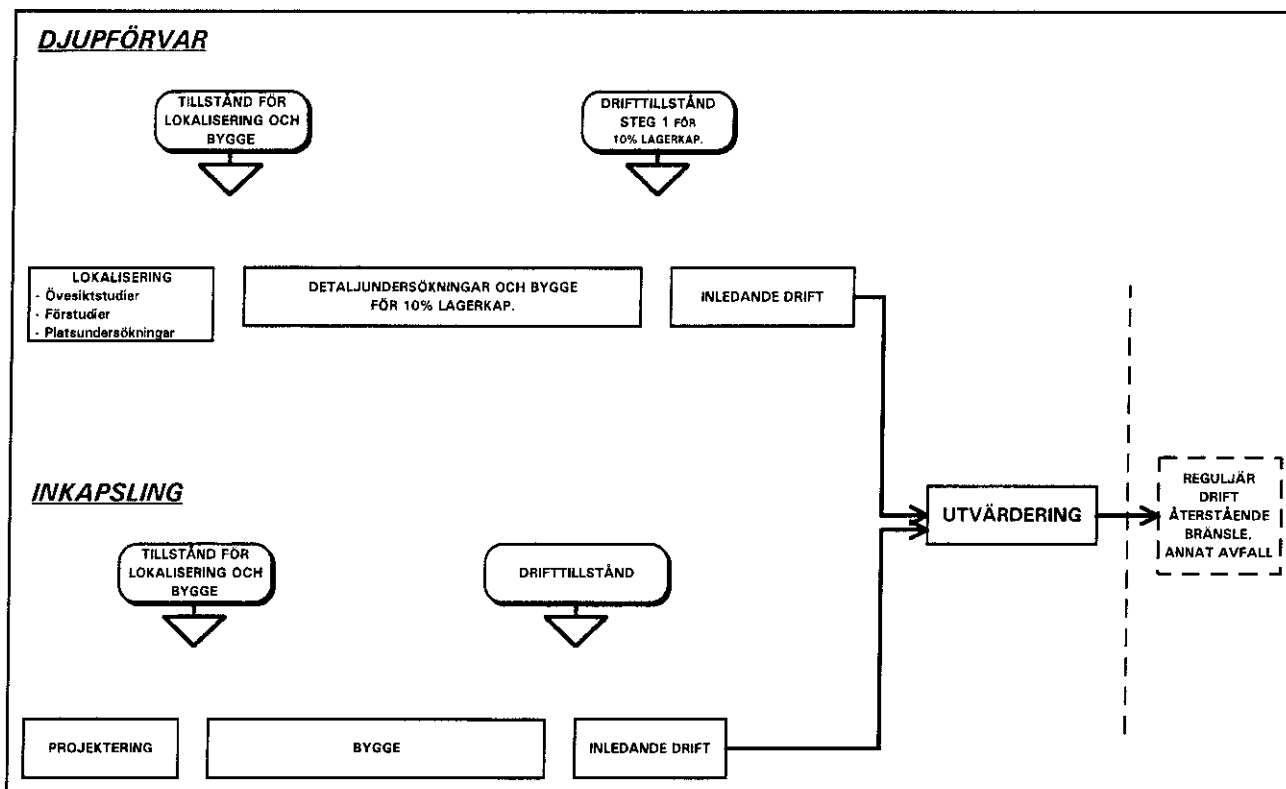
F n lagras allt använt kärnbränsle i CLAB. Denna lagring planeras ske i 30-40 år innan bränslet deponeras i ett djupförvar. Erfarenheter från långtidslagring av zirkaloy-kapslat bränsle sträcker sig tillbaka till slutet av 1950-talet. Dessa erfarenheter visar att lagring i åtminstone 50 år är möjlig och sannolikt kan lagringen vid behov utsträckas till åtminstone 100 år /3-12, 20/. M h t lagringstid och lagringskapacitet finns således möjlighet att fortsätta med lagring i CLAB ännu under flera årtionden. Detta blir då ett naturligt "nollalternativ" i det framtida MKB-arbetet för djupförvaret och inkapslingsanläggningen. Kompletterande säkerhetsanalyser (tidsperspektiv 100-tals år) planeras för detta alternativ.

Mellanlagring av använt kärnbränsle kan numera även genomföras med s k torr lagring. Teknik för detta har utvecklats och prövats i bl a Tyskland och USA /3-13,14/. Torrlagring kräver mindre underhåll och tillsyn än våtlagringen och kan därför övervägas som ett andrahands "nollalternativ" till djupförvaringen om man mot förmodan ej beslutar att etablera ett djupförvar inom säg 50 år. Även för detta fall kan kompletterande säkerhetsanalyser behöva genomföras.

3.3 ÖVERSIKT ÖVER ÅTGÄRDER VID STEGVIS UTBYGGNAD

I kompletteringsrapporten till FUD-program 92 /3-15/ redovisades ett schema över de viktigaste större stegen i uppförandet av en inkapslingsanläggning och ett djupförvar samt deponering av inkapslat bränsle i djupförvaret. Detta schema återges något modifierat och förenklat i Figur 3-1.

Åtgärderna som rör djupförvaret omsluter en tidrymd av ca sextio år eller längre från start av förstudier fram till genomförd förslutning av ett helt utbyggt förvar. Följande etapper urskiljes för **djupförvaret**:



Figur 3-1. Schema över de viktigaste större stegen i programmet jämte erforderliga tillstånd. Den övre halvan på figuren avser lokalisering, utbyggnad och drift av ett djupförvar medan den undre halvan avser motsvarande steg för en inkapslingsanläggning. För vardera anläggningen markeras huvudaktiviteter, samt viktiga tillstånd.

Lokalisering som syftar till att ta fram det underlag som behövs för beslut om lokalisering (naturresurslagen) och uppförande (kärntekniklagen) av förvaret. Arbetet sker i två etapper där den första etappen omfattar förstudier och översiktstudier och andra etappen platsundersökningar. De senare genomförs i första hand på två platser som väljs på grundval av för- och översiktsstudierna.

Detaljundersökningar av en plats. Utförande av sådana undersökningar förutsätter att tillstånd erhållits enligt lagen om hushållning med naturresurser (NRL) /3-16/. Arbetet innebär att byggnadsarbeten i berg genomförs i viss omfattning. I realiteten påbörjas därmed även **Byggnadsetapp 1** som avser en anläggning för deponering av ca 400 kapslar med använt kärnbränsle från det svenska programmet. I regeringens beslut över kompletteringen till FUD-program 92 anges och klargörs således att detaljundersökningen avser påbörjande av byggnation av en kärnteknisk anläggning och för detta krävs tillstånd även enligt kärntekniklagen (KTL) /3-21/. Under etappen byggs ovanjordsanläggning, gemensamma utrymmen under jord och de första deponeringsutrymmena under jord. Samtidigt tillverkas, levereras och provas erforderlig utrustning för deponering av

inkapslat bränsle och för därmed sammanhängande verksamheter.

Inledande drift som omfattar deponering av inkapslat använt kärnbränsle; ca 10% av den mängd som produceras av de svenska kärnkraftverken fram till 2010, dvs ca 800 ton (uranvikt) eller ca 400 kapslar. Deponeringsutrymmen byggs ut successivt i erforderlig takt.

Utvärdering. Om denna utfaller till förmån för fortsatt deponering av återstående mängd använt bränsle samt annat långlivat avfall ansökes om erforderliga tillstånd för utbyggnad och reguljär drift.

Bygge och reguljär drift som omfattar deponeringsutrymmen för allt återstående använt kärnbränsle och allt annat långlivat avfall. Arbetena omfattar bergarbeten, byggnadsarbeten samt leverans och provdrift av utrustning för de delar av djupförvaret som inte ingår i steg 1. I den mån så erfordras m h t erfarenheter från inledande drift och utvärdering modifieras utformningen av anläggningen och utrustning. Under den reguljära driften deponeras återstående avfall. Detta steg är den i tid mest långvariga etappen i hela kedjan.

Övervakad lagring i djupförvaret under så lång tid man önskar. **Förslutning** av djupförvaret. Denna aktivitet ej markerad i schemat.

För **inkapslingsanläggningen** urskiljer man följande etapper:

Lokalisering och Projektering av anläggningen inklusive definitivt beslut om kapselutformning samt genomförande av erforderligt utvecklingsarbete. Arbetena genomförs i flera etapper med successivt ökande detaljeringsnivå fram till ansökan om tillstånd enligt NRL och KTL, vilka förutses inlämnade samtidigt.

Byggnadsetapp 1 som omfattar detaljprojektering och bygge av anläggning för inkapsling av använt kärnbränsle samt inaktiv provdrift av denna.

Inledande drift som omfattar aktiv provdrift samt inkapsling av ca 10% av det använda kärnbränslet, ca 400 kapslar.

Utvärdering. Sammanfaller med utvärdering av djupförvarens första steg enligt ovan.

Byggnad och reguljär drift som omfattar utbyggnad med en del för inkapsling av annat långlivat avfall (främst hårdkomponenter) samt inkapsling av resterande använt kärnbränsle och annat långlivat avfall.

Eventuell **rivning** av anläggningen och deponering av uppkommet rivningsavfall – ej markerad i schemat.

3.4 MILJÖKONSEKVENSBESKRIVNING OCH MKB-PROCESS

För att få lokalisera och uppföra en inkapslingsanläggning eller ett djupförvar krävs bl a tillstånd enligt naturresurslagen och kärntekniklagen. Tillstånd lämnas av regeringen. Härutöver krävs i olika skeden även godkännande enligt bl a miljöskyddslagen, strålskyddslagen och eventuellt vattenlagen, samt bygglov. För alla ovan nämnda lagar gäller numera att en tillståndsansökan skall innehålla en miljökonsekvensbeskrivning (NRL, miljöskyddslagen, Vattenlagen) eller att ansvarig myndighet kan föreskriva att det skall upprättas en miljökonsekvensbeskrivning (KTL, strålskyddslagen). Myndigheterna får även besluta vad MKBn skall innehålla, men det är framförallt i den process genom vilken konsekvensbeskrivningarna växer fram som en meningsfull MKB utvecklas.

Syftet med en miljökonsekvensbeskrivning är att möjliggöra en samlad bedömning av anläggningens inver-

kan på miljön, människors hälsa och säkerhet samtushållningen med landets naturresurser. Den principiella omfattningen av och innehållet i en miljökonsekvensbeskrivning illustreras i Figur 3-2. MKB är alltså ett verktyg som skall möjliggöra att en verksamhet värderas ur miljösynpunkt innan tillstånd till verksamheten ges, d v s MKBn skall vara ett beslutsunderlag för prövningsmyndigheten vid beslut om tillstånd och villkor. Vidare skall MKB möjliggöra att berörda parter och allmänheten skall få insikt i lokaliseringsprocessen och beredas tillfälle att lämna synpunkter. En beskrivning av hur SKB planerar utformningen av MKB-processen har redovisats i ett KASAM seminarium /3-22/.

Formellt skulle olika krav på MKB kunna komma att ställas enligt olika lagar. Detta skulle emellertid strida mot intentionerna bakom MKB-lagstiftningen (underlag för en samlad bedömning). I stället blir det en viktig funktion hos MKB-processen att just åstadkomma ett samlat beslutsunderlag. Enligt förordningen om miljökonsekvensbeskrivningar skall en MKB innehålla en motiverad redovisning av alternativa lokaliseringar och utformningar, samt uppgifter om konsekvenserna av att den sökta åtgärden inte vidtas (det s k nollalternativet).

Lagstiftningen ger inga närmare riktlinjer för hur MKB-processen skall utformas. Det betyder att berörda intressenter ("aktörerna") har stor frihet att själva gemensamt utforma processen. SKB har därför inte heller på egen hand utarbetat någon detaljerad beskrivning för hur MKB-processen bör genomföras. SKB har i stället i ett tidigt skede tagit upp en dialog lokalt och med berörda myndigheter i samband med att planerings- och utredningsarbetena rörande inkapslingsanläggningen och djupförvaret påbörjats.

Kärnkraftindustrin har traditionellt och allt sedan kärnkraftens införande utvärderat anläggningars säkerhet och inverkan på miljön och publicerat dessa utvärderingar i speciella rapporter. I samband med byggandet av kärnkraftverk eller andra kärntekniska anläggningar, t ex SKBs slutförvar för radioaktivt driftavfall (SFR) har man utarbetat s k preliminära och slutliga säkerhetsrapporter (PSR resp SSR). Dessa ansluter nära till de motsvarande rapporter som tas fram för liknande anläggningar utomlands. Ickeradiologiska miljöfrågor har också redovisats i underlaget för beslut om lokalisering och uppförande. Kontakter har tagits på ett tidigt stadium med berörda myndigheter, kommuner och närboende. Det finns därför värdefulla erfarenheter inför arbetet med lokaliseringen av djupförvaret.

Kommande MKB-process innebär dock en bredare och mera ingående dialog mellan alla berörda. Viktiga aktörer blir framför allt de som kan komma att hysa anläggningen (kommunen med bl a de närboende), den som skall bygga och driva anläggningen (SKB) samt tillsynsmyndigheter och länsstyrelse. Det är tillfredsställande att regeringen nu har medgett att berörda kommuner får resurser så att de på ett kvalificerat och trovärdigt sätt kan medverka i MKB-processen.

För inkapslingsanläggningen har det formella MKB-arbetet inletts. En samrådsgrupp för MKB-frågor har

Miljökonsekvensbeskrivning (MKB)



Alternativ i fråga om:

• Systemval

• Lokalisering (platsval)

Konsekvenser

– i fråga om:

- Radiologiska effekter
- Icke radiologiska effekter
- Samhälleliga effekter
- Sociala effekter

– i samband med:

- Undersökningar
- Bygge
- Drift steg 1
- (Återtagande)
- Drift steg 2
- Förslutning
- Slutet förvar (långa tider)

– för:

- Personal
- Allmänhet
- Djur/natur

– som är:

- Faktiska
- Mer eller mindre möjliga (olyckor, missöden, långsiktiga risker etc)

Figur 3-2. Illustration av struktur för miljökonsekvensbeskrivningen.

bildats under ledning av länsstyrelsen i Kalmar län. Övriga deltagare är Oskarshamns kommun, SKI, SSI och SKB. Som ett första steg har en genomgång av alternativ och en översiktligt bedömning av olika miljökonsekvenser genomförts. Parallellt har Oskarshamns kommun inlett ett omfattande informations- och samrådsarbetet.

För djupförvaret pågår s k förstudier i några kommuner. Även om dessa inte genomförs inom någon formellt definierad MKB-process så innehåller ändå arbetet många moment av det som är viktigt i en sådan. De sker bl a under öppenhet och omfattande insyn och medverkan från olika intressenter. Uppsättningen av frågor som belyses har stor bredd och de olika aktörerna har möjlighet att påverka vilka frågor som skall tas upp.

Om lokaliseringsstudierna i en kommun går vidare efter förstudien med platsundersökningar så måste arbetet med att ta fram den miljökonsekvensbeskrivning som platsundersökningarna skall resultera i påbörjas tidigt. Därför menar SKB att formerna för MKB-processen skall överenskommas mellan berörda parter. Genom att det finns en angiven plats kan närboende, markägare och konkurrerande markanvändningsintressen identifieras och ges insyn och inflytande i processen. För aktuella kommuners del kommer erfarenheterna från förstudien att vara av stort värde. Såväl kommunledning som olika intressegrupper har genom förstudien skaffat sig bety-

dande kunskap i frågan och kan därför bevaka sina intressen och konstruktivt bidra till en stabil och trovärdig process.

Den närmare utformningen av MKB-processen måste överenskommas genom diskussion mellan bl a kommunen, SKB och myndigheterna. Den modell och de erfarenheter som finns från MKB-arbetet för inkapslingsanläggningen kan tjäna som viktigt underlag för diskussionen om hur MKB-processen för djupförvaret bör utformas. Regeringen har också framfört att berörda länsstyrelser skall ta ett samordnande ansvar. I samband med MKB-arbetena för djupförvaret skall också transporterna utredas. Dessa kan komma att beröra även andra kommuner än de som omfattas av studierna av inkapslingsanläggningen och djupförvaret. De s k transitkommunerna skall ges möjlighet att delta i MKB-arbetet på likvärdig basis angående miljökonsekvensbeskrivningen av transporterna.

En viktig fråga i MKB-arbetet såväl för inkapslingsanläggningen som för djupförvaret är kopplingen dem emellan. Sålunda behöver t ex möjligheterna till samlokalisering belysas i MKBn. När man så småningom tar ställning till lokalisering av respektive anläggning påverkas rimligen bedömningarna för en av anläggningarna av hur långt arbetet har kommit med den andra. Beslut om att bygga en av anläggningarna kommer inte

att fattas om inte arbetet med den andra är tillräckligt
framskridet.

4 DJUPFÖRVARING – PRINCIPER OCH KRAV

I detta kapitel diskuteras den kunskap som krävs samt vissa grundläggande principer och krav för djupförvaring av använt kärnbränsle i kristallint urberg. I kapitel 5, 6 och 8 redovisas mer specifikt de resultat som uppnåtts och det kunskapsläge som detta program bygger på.

4.1 VILKEN KUNSKAP KRÄVS?

Det svenska kärnbränslet skall slutförvaras på ett säkert sätt. För att i praktiken uppfylla detta mål krävs kunskap och kunnande inom en rad områden. Det handlar om att kunna

- Hantera, behandla, transportera och deponera avfall.
- Lokalisera och uppföra de erforderliga anläggningarna.
- Analysera och beskriva säkerhetsfrågor och miljökonsekvenser.

För centrala frågor, t ex säkerhetsanalys, är det viktigt med en grundläggande förståelse av fysikaliska och kemiska processer. Denna kunskap skall ligga på en hög internationell nivå även i viktiga detaljer. Till betydande delar kan arbetet i dag bygga på etablerad kunskap och beprövad erfarenhet. I vissa avseenden måste ny teknik utvecklas och ny kunskap tas fram.

4.1.1 Hantering, behandling, transport och deponering av avfallet

Hantering och transport av kärnavfall och använt kärnbränsle är känd teknik. Praktisk erfarenhet finns sedan flera decennier i såväl Sverige som i andra länder. Inkapsling av använt kärnbränsle på det sätt som SKB planerar har däremot inte genomförts i praktiken. Utformning, tillverkning och förslutning av kapslar är därför ett nyckelområde i programmet. Det omfattande utvecklingsarbetet på detta område beskrivs närmare i kapitel 6 och 7.

Transporter av inkapslat använt kärnbränsle har av naturliga skäl ännu inte genomförts i praktiken. Inkapslat bränsle är emellertid bättre skyddat och har väsentligt lägre strålningsnivå och lägre värmeutveckling än det använda bränsle som idag transporteras mellan kärnkraftverken och CLAB. Transporter av kärnbränsle på väg och/eller järnväg sker sedan lång tid tillbaka i flera länder. Sammantaget innebär detta att tekniken för transport till djupförvaret av kapslarna med bränsle i allt väsentligt kan bygga på etablerad kunskap. Vad som

krävs är anpassning av den tekniska utformningen. Se vidare kapitel 8 och 9.

Hanteringen av kapslarna vid djupförvaret omfattar flera moment:

- Mottagning och nedtransport av behållare med kapsel.
- Överföring av kapsel till hanteringsmaskin i deponeringstunnel.
- Inplacering av kapsel i deponeringspositioner.

Av dessa moment är hanteringen av kapslar i deponeringstunnlar och inplacering av dem i deponeringspositioner det nya och centrala. Ett kvalificerat projekterings- och konstruktionsarbete behöver genomföras för att ta fram ändamålsenliga hanteringsutrustningar. Övrig hantering av avfall i djupförvaret kan ske med anpassning av redan etablerad teknik. I kapitel 8 och 9 redovisas närmare kunskapsläge och program för djupförvarsteknik.

Det behövs också buffert- och återfyllnadsmaterial i djupförvaret. Man måste kunna

- Tillverka och applicera bentonitbufferten i deponeringshålen.
- Återfylla deponeringstunnlarna.
- Försluta hela djupförvaret.

Utveckling av de metoder som skall användas i dessa avseenden utgör en viktig del av kärnavfallsprogrammet. Arbeten har pågått under lång tid. Försök genomfördes inom Stripa-projektet under 1980-talet och ytterligare arbeten kommer att genomföras i Äspölaboratoriet. I kapitel 5 samt 8-12 redovisas närmare resultat, kunskapsläge och program.

4.1.2 Lokalisering och uppförande av erforderliga anläggningar

Lokalisering, i synnerhet av ett djupförvar, är en mångfacetterad och kontroversiell verksamhet. Den handlar om såväl teknik och säkerhet som samhällsplanering, politik och opinion. Den konkreta erfarenhet och kunskap som finns rör tidigare etableringar av kontroversiella anläggningar av liknande slag i Sverige och utlandet. SKB och kärnkraftverkens ägare har lång erfarenhet från olika typer av lokalisering bl a etableringen av CLAB, SFR och Äspölaboratoriet. Inga tidigare exempel är dock i alla avseenden direkt och entydigt tillämpbara när det gäller djupförvaret.

Sedan FUD-program 92 /4-1/ publicerats påbörjades ett konkret lokaliseringsarbete. Bakgrundsmaterial

(översiktsstudier) har sammanställts och lokaliseringsutredningar (förstudier) har genomförts /4-2/ eller påbörjats. Lokaliseringsprocessen och -kriterierna har i enlighet med de krav regeringen ställt /4-3/ beskrivits mera ingående i den kompletterande redovisningen till FUD-program 92 /4-4/.

Förstudierna har lett till omfattande diskussioner framförallt i de kommuner som berörts men även regionalt och på det nationella planet. SKB såväl som övriga aktörer (myndigheter, politiker, allmänhet) har fått viktiga och värdefulla erfarenheter för det fortsatta arbetet. Svårigheter och möjligheter i lokaliseringsarbetet har tydliggjorts. Arbetet med förstudier har visat sig ta längre tid än vad SKB planerade i FUD-program 92, bl a därför att frågan redan i detta tidiga skede väcker mycket diskussion.

Sammantaget har utvecklingen stegvis lett fram till att det finns en bra plattform för att fortsätta att ta fram det underlag som behövs för lokaliseringen av djupförvaret. Processen och kriterierna har förtydligats av SKB och accepterats av myndigheter och regering. Regeringen har vidare i sitt beslut /4-5/ klargjort prövningsförfarandet. Regeringen har dessutom beslutat om medel till berörda kommuner för medverkan i processen. Det konkreta lokaliseringsarbetet har kommit igång genom förstudier på olika håll i landet.

Lokaliseringen av djupförvaret är en nyckelfråga i kärnavfallsprogrammet. Genom fortsatt noggrant, uthålligt och öppet lokaliseringsarbete bör det gå att komma fram till en bra lösning. I anslutning till detta FUD-program publicerar SKB en samlad redovisning av översiktsstudierna /4-6/. Kunskapsläge och planer rörande lokalisering redovisas i kapitel 8 och 9. För inkapslingsanläggningen planerar SKB en utbyggnad i anslutning till CLAB eftersom detta ger flera uppenbara fördelar. Under det pågående MKB-arbetet kommer även alternativa lokaliseringar att analyseras t ex i anslutning till djupförvaret, se kapitel 7.

Vad gäller bygge av de erforderliga anläggningarna (inkapslingsanläggning och djupförvar) finns omfattande kunskap att utgå ifrån. Erfarenheter från uppförande av kärnkraftverk och CLAB kan utnyttjas för projektering och bygge av inkapslingsanläggningen och ovanjordsanläggningarna vid djupförvaret. I Sverige finns vidare betydande kunskap från byggande av berganläggningar för gruvverksamhet, kraftproduktion, oljelager och försvar. SKB har egna direkta erfarenheter från berganläggningarna vid CLAB, SFR och Äspölaboratoriet. Sammantaget ger detta en bred kunskapsbas. På några viktiga punkter krävs särskilda utvecklingsinsatser. Det gäller framförallt metoder och teknik för geovetenskapliga platsundersökningar och detaljundersökningar av en utvald plats. Detta har ingått som en stor och viktig del i SKBs program sedan lång tid tillbaka. En "generalrepetition" av metodiken kan sägas ha skett genom arbetena för Äspölaboratoriet. Dessa innebär utprovning och utvärdering på en verklig plats och under

realistiska förhållanden innan metoderna tillämpas för djupförvarsprojektet. En redovisning av kunskapsläge rörande bergundersökningar och bygge av anläggningarna ges i kapitel 6 och 8. Program för Äspölaboratoriet beskrivs i kapitel 12.

4.1.3 Säkerhetsanalyser och miljökonsekvensbeskrivningar

För att få genomföra den planerade slutförvaringen måste SKB ingående analysera och redovisa säkerhetsfrågor och miljökonsekvenser. Kärnkraftindustrin har traditionellt och allt sedan kärnkraftens införande utvärderat anläggningars säkerhet och inverkan på miljön. SKB har tidigare i samband med byggandet av CLAB och SFR utarbetat s k preliminära och slutliga säkerhetsrapporter. Icke-radiologiska miljöfrågor har också redovisats i underlaget för beslut om lokalisering och uppförande av dessa anläggningar. Det finns därför omfattande och värdefulla erfarenheter inför arbetet med säkerhetsanalyser och miljökonsekvensbeskrivningar för de nu planerade anläggningarna. Vid utarbetandet av miljökonsekvensbeskrivningar skall ett omfattande samråd ske mellan sökanden, lokala intressenter och centrala myndigheter. Se även avsnitt 3.4.

Rörande metoder och vetenskapligt underlag för analys av ett djupförvars långsiktiga säkerhet bedriver SKB sedan lång tid ett omfattande FoU-program. Viktiga områden i detta program är:

- karaktärisering av använt bränsle och studier av bränslets beständighet i grundvatten,
- kapslars beständighet i ett djupförvar,
- bentonitbuffertens funktion,
- grundvattnets kemiska sammansättning och grundvattenrörelser i berget,
- kemiska förhållanden och reaktioner i ett djupförvar,
- bergets stabilitet,
- radionuklidtransport i djupförvar, berggrund och biosfär,
- dosberäkning.

Principer för strålskydd och säkerhet redovisas i avsnitt 4.2 nedan. Förvarets säkerhetsfunktioner och funktionskrav beskrivs översiktligt i 4.3.

I kapitel 5 redovisas kunskapsläget inom de delar av programmet som rör underlaget för analys av den långsiktiga säkerheten. I en särskild rapport (SR 95 /4-11/) redovisas dels en mall för hur kommande säkerhetsrapporter kommer att struktureras, dels de metoder och beräkningsverktyg som SKB idag har tillgängliga för att genomföra analyser av den långsiktiga säkerheten.

Program för fortsatta FoU-arbeten inom detta område presenteras i kapitel 10, 11 och 12.

4.2 PRINCIPER FÖR STRÅLSKYDD OCH SÄKERHET

4.2.1 Allmänt

Hantering av radioaktivt avfall måste genomföras med hänsyn till etablerade principer för skydd mot joniserande strålning, /4-7, 8/

- Verksamheten skall vara berättigad, skyddet skall vara optimerat och individen skall vara skyddad genom dosgränser.
- Strålskyddet skall avse människors hälsa samt naturen i form av förutsättningar för den biologiska mångfalden och utnyttjandet av naturresurser.
- Strålskyddet skall vara oberoende av om doserna uppkommer idag eller i framtiden eller om de ges inom eller utom nationsgränserna.
- Strålskyddet i hantering och långsiktig förvaring skall vara likvärdigt med det som gäller inom annan radiologisk verksamhet, t ex andra verksamhetsdelar i kärnbränslecyclen.

Med hänsyn till den långa tidsperiod som måste beaktas vid planeringen av ett djupförvar, har specifika förslag till riktlinjer för ett slutförvar föreslagits /4-9/:

- Förvaret skall för sin långsiktiga säkerhet inte vara avhängigt av framtida generationers övervakning och underhåll. Detta utesluter dock inte att förvaret kan övervakas under en period efter att avfallet deponerats eller att förvaret förseglats.
- Förvaret skall inte utformas så att det onödigtvis försvårar ev framtida åtgärder att förändra förvaret eller att återtaga avfallet.
- Förvarets långsiktiga säkerhet skall bygga på flera passiva barriärer arrangerade så att degraderingen av en barriär inte avsevärt försämrar förvarets helhetsfunktion.
- Under en rimligt förutsägbar tidsperiod skall stråldoser till individer orsakad av förväntade utsläpp vara lägre än 0,1 mSv/år, därefter skall radionuklidflödet från förvaret begränsas till i nivå med naturligt förekommande flöden.
- Sannolikheter och konsekvenser av oväntade allvarliga störande händelser skall bedömas i jämförelse med skaderisken i s k kritisk grupp vid ovan givna individdosgräns.

Förvarets säkerhet beror på avfallets farlighet och dess tillgänglighet. Bedömningen av förvarets säkerhet påverkas av tiden dels genom att mängden farliga radionuklider minskar, dels genom att osäkerheten vad gäller kvantifieringen av förvarets säkerhetsfunktioner ökar med växande tid. Begreppet rimligt förutsägbar tidsperiod anknyter främst till den tidsberoende osäkerheten i förvarssystemets funktion. Potentiella spridningsvägar för radionuklider till människan kan förändras med tiden men sådana förändringar kommer att ske i olika takt för

de olika delarna i barriärsystemet. Erfarenheten visar att väsentliga förändringar i biosfären inträffar i tidskalan 100-1000 år. Den geologiska miljön djupt ner i den fennoskandiska urbergsskölden uppvisar däremot stabila förhållanden i perspektivet millioner år.

Möjligheterna att kvantifiera förvarets säkerhet (eller risken från förvaret) är följaktligen beroende av den tidsperiod man är intresserad av. SSI har diskuterat tidsperspektivets inverkan på strålskyddsredovisningen /4-10/ och framhåller:

- Särskilt stor vikt skall ges åt att redovisa skyddet för perioden fram till förvarets förslutning och under de första tusen åren därefter, med särskild fokus på närboende människor.
- Individdos fram till nästa istid, dvs fram till ca 10 000 år, skall redovisas som bästa uppskattning med angivande av bedömda felgränser. Skyddet av naturen skall bedömas över samma tidsperiod.
- För perioden från nästa istid och framåt skall kvalitativa bedömningar göras av vad som kan hända med förvaret, inklusive överväganden som beaktar risken för förhöjda utsläpp.

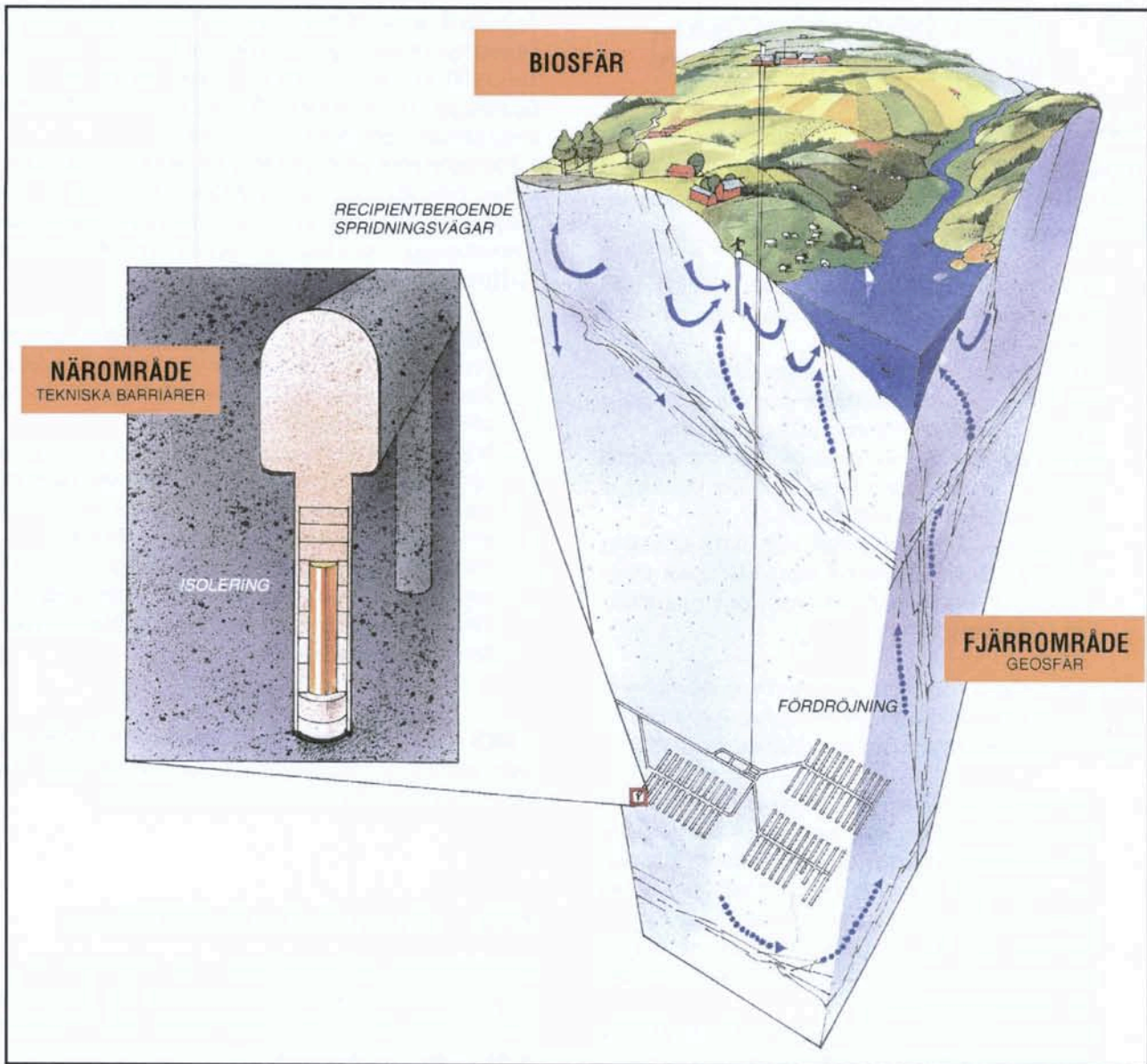
SKB avser utnyttja dessa riktlinjer vid kommande redovisningar av strålskydd och säkerhet för olika scenarier för ett djupförvar i olika tidsperspektiv.

4.2.2 Förvarets säkerhetsfunktioner

För att uppnå önskad säkerhet vid byggandet av ett djupförvar, under driftskedet och under det långsiktiga förvarsskedet, ställs krav på hur förvaret och där ingående komponenter skall fungera. Den sammantagna funktionen av förvarets alla komponenter skall tillsammans ge en betryggande säkerhet i verksamheten.

För att åstadkomma en långsiktig säkerhet utformas förvarssystemet för att **isolera** det använda kärnbränslet från biosfären. Isoleringen åstadkommes genom att det använda kärnbränslet innesluts i täta kapslar som deponeras djupt i kristallin berggrund på en utvald förvarsplats. Förvaret har därutöver funktionen att **hålla kvar** radionukliderna och **fördröja** deras transport om isoleringen skulle brytas. Via platsval och lämplig anpassning av förvaret till förlägningsplatsen kan dessutom spridningsvägar och utspädningsförhållanden i biosfären påverkas så att eventuellt frigjorda radionuklider endast i mycket små mängder kan nå människan. Figur 4-1 visar förvarssystemets olika delar och deras huvudsakliga säkerhetsfunktioner.

Materialen i förvaret har valts med hänsyn till att deras långsiktiga stabilitet och säkerhetsfunktion i förvaret skall kunna underbyggas med erfarenheter från naturen. Av samma skäl begränsas den termiska och den kemiska störning som förvaret tillåts ge i sin omgivning. Säkerhetstänkandet för djupförvaret bygger på flerbarriärs-



Figur 4-1. Djupförvarssystemets delar och deras viktigaste säkerhetsfunktioner.

principen, d v s att säkerheten inte enbart får vara avhängig av att en ensam barriär skall fungera som planerat. Säkerhetsfunktionerna påverkas av platsval, layout, samt av utformning och dimensionering av de tekniska barriärerna. Funktionerna kan delas upp på tre nivåer:

Nivå 1 – Isolering

Så länge avfallet är isolerat kan radionukliderna avklinga utan att komma i kontakt med människan och hennes omgivning.

Nivå 2 – Fördröjning

Om isoleringen bryts begränsas mängden radionuklider som kan nå biosfären genom:

- mycket långsam upplösning av det använda bränslet,
- sorption och långsam transport av radionuklider i närområdet,
- sorption och långsam transport av radionuklider i berggrunden.

Nivå 3 – Recipientförhållanden

De spridningsvägar längs vilka eventuellt frigjorda radionuklider kan nå människan styrs i stor utsträckning av förhållandena där det djupa grundvattnet först når biosfären (utspädning, vattenanvändning, markanvändning och övrigt utnyttjande av naturresurser). En gynnsam recipient innebär att stråldosen till människa och

miljö begränsas. Recipienten och spridningsvägarna påverkas dock av biosfärens naturliga förändringar.

Säkerhetsfunktion enligt nivå 1 och 2 är den viktigaste resp näst viktigaste. De uppnås genom krav på egenskaper och funktion hos både tekniska och naturliga barriärer samt på djupförvarets utformning. Inom de ramar som ges i övrigt eftersträvas även en god säkerhetsfunktion enligt nivå 3 genom lämpligt förläggning och utformning av djupförvaret.

4.2.3 Barriärernas säkerhetsfunktioner

De i Sverige diskuterade riktlinjerna för slutförvaring av använt kärnbränsle /4-9, 10/ ger säkerhetsmål för djupförvaret i sin helhet. Detta ger en möjlighet att, inom ramen för flerbarriärprincipen, utforma olika barriärers funktion så att erforderlig säkerhet kan uppnås på ett tillförlitligt och effektivt sätt. Funktionskraven påverkas också av målet att omhändertagandet av radioaktivt avfall skall genomföras på ett balanserat sätt med avseende på operativ och långsiktig säkerhet.

Nedan redovisas de förhållanden hos olika barriärer som medverkar till att definiera säkerhetsfunktionerna.

Isolering

På de djup som är aktuella för ett djupförvar enligt KBS-3 sker masstransport normalt endast med grundvattnet. Speciella transportvägar, förorsakade genom t ex intrång av människor, måste granskas separat. Isolering åstadkoms genom att det använda bränslet innesluts i täta kapslar. För att ge kapslarna en stabil och gynnsam miljö placeras de i deponeringspositioner i ett tunnelsystem på ca 400 - 700 m djup i berget, och omges med ett plastiskt lermaterial med låg genomsläpplighet för grundvattnet.

Kapselns funktion att isolera det använda bränslet påverkas i praktiken av kombinationen av

- de tekniska barriärernas utformning och kvalitet,
- platsspecifika förhållanden,
- förvarsdjup och utformning av förvaret och dess närområde.

För att tillförsäkra sig en betryggande isolering med tillräcklig varaktighet måste acceptansnivåer eller krav i första hand anges för

- kapslarnas material och dimensioner samt kontrollmetoder för kapslarnas kvalitet,
- buffertmaterialets kemiska och fysikaliska egenskaper,
- metoderna för buffertens konditionering och applicering samt kontrollmetoder för dess applikation,
- deponeringshålets geometri och metoderna för håltagning,
- mekaniska, kemiska och hydrauliska förhållanden i deponeringshålets omedelbara omgivning,

- grundvattenkemiska förhållanden i förläggningsområdet,
- förläggningsbergets stabilitet,
- strålnings- och temperaturnivåer i förvaret.

Isoleringen kan brytas genom en oupptäckt defekt från tillverkningen, genom inre eller yttre mekaniska påkänningar eller genom inre eller yttre korrosion. Målet är att isoleringen skall kunna motstå den påverkan som erhålls från korrosion, buffertsvällning och hydrostatiskt tryck under de ca 100 000 år som erfordras tills det använda bränslets potentiella farlighet kommit i nivå med natururan. Förvaret skall även kunna bibehålla isoleringen vid berg rörelser i förvaret förorsakade av förväntade spänningsomlagringar. Antalet eventuella kapselskador till följd av förändringar/belastningar som bedöms uppkomma vid en framtida istid bör vara begränsat.

Fördröjning

Skulle isoleringen brytas p g a att någon kapsel skadas kommer bränsle i kontakt med vatten, varvid radionuklider kan lösas ut. Radionuklider som frigjorts ur bränslematrisen kan transporteras genom den defekta kapseln via buffertmaterialet till det rörliga grundvattnet i berget, och därifrån vidare genom berggrunden till recipienter i biosfären. Massflödet bestäms av de transport- och fördröjningsprocesser som verkar i närområdet och omgivande berggrund.

Upplösningsprocessen påverkas av

- det använda bränslet och dess egenskaper d v s
 - inventarium och egenskaper för radionukliderna,
 - bränslematrisens egenskaper,
 - temperatur och strålningsfält i och kring kapseln,
- de tekniska barriärerna, d v s
 - kapselskadans karaktär,
 - kapselmaterial och buffertmaterial, samt ev konstruktionsmaterial i närområdet,
 - tillgänglig vattenmängd,
- platsspecifika förhållanden
 - grundvattenkemi som redoxförhållanden och salthalt.

Transportmekanismer och fördröjningsmekanismer i närområdet och anslutande berg kan påverkas av

- utformning av och egenskaper hos de tekniska barriärerna,
- utformningen av deponeringshål och tunnlar,
- inverkan på närliggande berg av metoderna för berguttag,
- förvarsplatsens topografi, dess geologiska strukturer och dessas hydrauliska anslutning till närområdets tekniska barriärer,
- nuklidernas sorption på tillgängliga fasta ytor.

Inom ramen för den utformning som krävs för att skapa och bibehålla en god isolering mellan bränsle och grundvatten skall förhållanden i förvarets naturliga och tekniska barriärer väljas så att radionuklidernas löslighet begränsas och transporten fördröjs.

Löslighetsbegränsningen förutsätter en definition av acceptabla intervall vad gäller grundvattnets kemiska sammansättning och en begränsning av påverkan från material och ev föroreningar i närområdet. Den storskaliga transporten av radionuklider genom berget styrs av grundvattenrörelserna i förvarsområdet, tillgängliga ytor för sorption och indiffusion längs transportvägarna och de grundvattenkemiska betingelserna i området.

Kraven på de tekniska barriärerna formuleras som begränsningar av kemiska parametrar (t ex redox-potential, bentonitens stabilitet) och transportparametrar (t ex buffertens hydrauliska konduktivitet, temperaturer). Kraven på förvarets berggrund formuleras som säkerhetsrelaterade lokaliseringsfaktorer och genom förvarets anpassning till lokala geologiska strukturer.

Recipientförhållanden

Skulle isoleringen brytas kommer radionuklider som inte avklingar eller fixeras i berget att nå biosfären. En gynnsam recipient innebär att den potentiella stråldosen till människan från de radionuklider som når biosfären begränsas.

De spridningsvägar längs vilka radionuklider kan nå människan beror främst av utspädning, vattenanvändning och markanvändning i de punkter där det djupa grundvattnet från förvaret först når biosfären. Genom ett lämpligt val och utnyttjande av en förlägningsplats kan således potentiella stråldoser ytterligare begränsas.

Många förändringar av vikt för spridningsvägarna i biosfären är dock synnerligen komplexa, och sker över mycket kortare tidrymd än motsvarande förändringar i geosfären. En säkerhetsfunktion som baseras på gynnsamma förhållanden i recipienten är därför inte lika allmängiltig och långsiktig som säkerhetsfunktioner grundade på berggrunden och/eller de tekniska barriärerna.

4.3 BARRIÄRFUNKTIONER – KRAV

4.3.1 Allmänt

Ett djupförvar för radioaktivt avfall skall utformas med hänsyn till säkerhet, byggbarhet och effektivitet vad gäller kostnader och resurser. Genom val av deponeringsmetod, platsval och anpassning av förvarets utformning och layout till platsens egenskaper, genom teknik och kontrollmetoder för förvarets utbyggnad, samt genom materialval, utformning och dimensionering av de tekniska barriärerna kring det radioaktiva

avfallet kan förvarets säkerhet påverkas. Andra faktorer som också påverkar säkerheten är egenskaperna hos det radioaktiva avfallet och där ingående radionuklider. Tillgången till lämpligt berg i Sverige och avfallets egenskaper utgör förutsättningar för hur förvaret skall utformas.

I avsnitt 4.2 diskuteras förvarets säkerhetsfunktioner och hur dessa påverkas av olika processer och förhållanden i barriärerna. I detta avsnitt sammanfattas de krav som ställs eller kan komma att ställas på plats/layout och på de tekniska barriärerna, samt för metoderna för deras tillverkning/utförande och för deras kontroll. En utgångspunkt för formulering och kvantifiering av krav är bl a genomförda funktions- och säkerhetsanalyser. Kunskapsläget för att förstå och kvantifiera de processer som ligger till grund för kraven redovisas i kapitel 5, avsnitten 5.3 – 5.8. Kunskapsläget om processer väsentliga för kapselns funktion och tillverkning har samlats i kapitel 6.

Kvantifieringen av kraven på barriärerna måste genomföras i och med att design och tillverkningsmetoder fastställs. För kapseln pågår detta arbete och arbetsläget redovisas i kapitel 6. De tider vid vilka materialspecifikationer, utformningar eller dimensioner fastställs måste anpassas till projekteringen av tillverkning och hantering av de tekniska barriärerna. De kvantitativa krav som redovisas i FUD-program 95, speciellt i kapitel 6 och 8, skall betraktas som tentativa och kan komma att ändras i den fortsatta projekteringen.

Kopplingen mellan platsens karakterisering och successiva beslut rörande hur platsen skall utnyttjas och hur förvarets layout skall utformas, med hänsyn till säkerhet och byggbarhet, kommer att diskuteras i en planerad särskild rapport om programmet för platsundersökningar.

Logiskt sett borde olika barriärers funktionskrav kunna härledas direkt ur förvarets kvantitativa säkerhetsmål (uttryckt t ex i dosgränser). För förvar med flera barriärer ger dock en sådan härledning inte entydiga krav på de enskilda barriärerna. Kraven på enskilda barriärerna formuleras därför främst på basis av:

- parameterbegränsningar för att göra det möjligt att utesluta eller försumma vissa processer,
- tillgänglig teknologi,
- kostnads- och tillförlitlighetsoptimering.

Överväganden om hur övertygande olika barriärers funktion kan bevisas och hur känsliga olika barriärer är för variationer i den omgivande miljön påverkar avvägningen mellan barriärernas skyddseffekt.

4.3.2 Förlägningsplats och berget som barriär

Platsen skall väljas så den har goda förhållanden vad gäller:

Nivå 1 – isolering

- mekanisk stabilitet hos berget,
- kemisk miljö i grundvatten/berg med avseende på kapseln och bufferten,
- förekomst och transport av för kapseln korrosiva ämnen,
- begränsning av framtida intrång och alternativa användningar,
- grundvatten.

Nivå 2 – fördröjning

- begränsning av radionuklidernas löslighet och transport till biosfären,
- kemisk miljö i grundvatten/berg med avseende på bränslets upplösning och bufferten,
- grundvatten.

Nivå 3 – recipientförhållanden

- grundvattenutspädning och näringskedjor.

4.3.3 Kapsel

Kapseln skall utformas och tillverkas så att den

Nivå 1 – isolering

- är tät vid deponeringen,
- tål kemisk påverkan från
 - syre och andra oxidanter som tillförs under förvarets bygg- och driftperiod,
 - ämnen som normalt kan förekomma i reducerande grundvatten,
- begränsar effekterna till följd av
 - yttre och inre korrosion genom radiolysprodukter,
 - inre korrosion från kvarvarande rester av syre och vatten,
- tål mekaniska påkänningar orsakade av
 - hydrostatiskt tryck på förvarsdjup,
 - svälltrycket från buffertmaterialet,
 - extra laster vid en istid,
 - berggrörelser orsakade av spänningsomlagringar som följd av förvarets utbyggnad.

Nivå 2 – fördröjning

- inte i onödan och på ett påtagligt ogynnsamt sätt påverkar
 - det omgivande bergets normala egenskaper,
 - stabiliteten för kringliggande buffertmaterial,
 - upplösningstakten av bränsle om isoleringen bryts,
 - transport av radionuklider genom buffert och berg,

- så långt möjligt begränsar och fördröjer uttransporten av radionuklider från bränsle till buffert även om isoleringen bryts.

4.3.4 Buffert

Bufferten skall ge kapseln en gynnsam miljö för att bibehålla isoleringen, utgöra ett skydd mellan kapseln och berget med avseende på mekaniska och kemiska påverkningar samt, om kapselns isolering bryts, begränsa och fördröja uttransporten av radionuklider från förvaret.

För detta skall bufferten:

Nivå 1 – isolering

- helt omsluta kapseln under lång tid - ”stanna kvar i deponeringsutrymmet”,
- bära kapseln centrerad i deponeringshålet,
- förhindra strömning av grundvatten och därigenom fördröja intransporten av korrodanter,
- leda bort värme från kapseln,
- motstå kemisk omvandling under lång tid,
- ej äventyra kapselns och bergets möjligheter att uppfylla sina funktionskrav,
- skydda kapseln genom att utgöra ett plastiskt skydd mot berggrörelser.

Nivå 2 – fördröjning

- förhindra strömning av grundvatten och därigenom fördröja uttransport av radioaktiva ämnen,
- motstå kemisk omvandling under lång tid,
- helt omsluta kapseln under lång tid - ”stanna kvar i deponeringsutrymmet”,
- tillåta ev bildad gas att komma ut,
- filtrera kolloider.

4.3.5 Förvarets och närområdets utformning

Platsens gynnsamma egenskaper för att hindra och fördröja frigörelse av radionuklider till biosfären skall utnyttjas på bästa sätt genom förvarets utformning och djup anpassas till lokala förhållanden. I förvarsberget skall tunnlar och deponeringshål förläggas så att för säkerhet eller byggande ogynnsamma bergpartier undviks.

Förvaret skall utformas och bygget skall genomföras så att korrosionen på kapseln begränsas med hänsyn till bl a mikrobiell aktivitet och syre och andra oxidanter som tillförs under förvarets bygg- och driftperiod.

Förvarets geometriska layout skall väljas med hänsyn till lokala bergspänningar, temperaturbegränsningar och vattenströmningsvägar. Utbyggnad och övriga arbeten skall utföras så att det omgivande bergets barriäregenskaper inte onödigtvis försämras.

Återfyllning av tunnlar och bergutrymmen skall göras för att återge berget ett visst mekaniskt stöd samt dessutom för att i deponeringstunnlar i tillräcklig omfattning begränsa volymökningen hos svällande bentonit i deponeringspositioner. Pluggning av tunnlar och schakt skall göras för att begränsa transportkapaciteten för grundvattnen längst de vägar som öppnats vid utbyggnaden. Innan övervakningen av förvaret avbryts skall förvaret förslu-

tas så att tillträde hindras. Material som används under byggnadsskede och deponering skall kontrolleras med hänsyn till ev konsekvenser av att de blir kvar i förvaret efter försegling.

Förvarets utformning skall även medge ett senare återtagande av avfallet om man så önskar i framtiden. Samtidigt måste internationella krav på fysiskt skydd – s k safeguards – av det klyvbara materialet uppfyllas.

5 KUNSKAPSLÄGE – LÅNGSIKTIG SÄKERHET

Med utgångspunkt från de principer och grundkrav på barriärsystemet som presenterats i kapitel 4 redovisas i detta kapitel kunskapsläget inom de olika områden som har betydelse för djupförvarets långsiktiga säkerhet. Denna genomgång av kunskapsläget har i vissa delar gjorts relativt omfattande med hänsyn till att i samband med remissgranskningen av FUD-program 92 framfördes synpunkten att det är svårt att bedöma det av SKB redovisade programmet utan att ha en uppfattning om hur SKB ser på kunskapsläget. Detta innebär inte att redovisningen är i alla delar uttömmande. Mer utförlig och detaljerad redovisning på olika områden ges i SKBs tekniska rapporter, i underlag till säkerhetsanalyser, i SKBs Annual Reports och i ett stort antal rapporter från t ex Stripa, Äspö och naturliga analogi-projekten.

Kapitlet inleds med en genomgång av metoder för säkerhetsanalys och för genomgång och definition av scenarier som kan påverka djupförvaret. Därefter följer en redovisning för det använda kärnbränslet, buffert och återfyllnadsmaterialen samt för berggrunden. Den svenska berggrundens egenskaper m a p djupförvaring redovisas jämförelsevis detaljerat. Avsikten är att ge en fyllig beskrivning av kunskapsläget som bakgrund till pågående förstudier och kommande platsundersökningar, samt till experimentverksamheten vid Äspölaboratoriet. Vissa specifika kemifrågor, som berör flera barriärer har samlats i ett särskilt avsnitt liksom vissa studier av naturliga analogier. Kunskapsläget för beskrivning av biosfären redovisas i ett separat avsnitt. Det avslutande avsnittet behandlar frågor rörande annat långlivat avfall som skall djupförvaras på liknande sätt som det använda bränslet. Kapselfrågorna behandlas i kapitel 6.

Inom varje avsnitt görs ett försök att definiera de relevanta frågeställningar som kräver ytterligare utvecklingsinsatser och som behandlas i framtida FUD-arbete.

5.1 METODER FÖR SÄKERHETSANALYS

5.1.1 Allmänt

På grundval av den erfarenhet som samlats genom forskning, experiment, studier av naturliga analogier etc, och på grundval av tidigare genomförda funktions- och säkerhetsanalyser, kan preliminärt optimerade förvarssystem utformas för slutlig förvaring av radioaktivt avfall. För att visa säkerheten för ett förvarssystem behöver de processer som är väsentliga för förvarets säkerhet identifieras, och deras förändring med tiden analyseras. Detta måste göras med hänsyn till givna platsspecifika förhållanden, vald förvarsutformning och layout, samt för den utformning, de mate-

rial och den dimensionering som valts för de tekniska barriärerna.

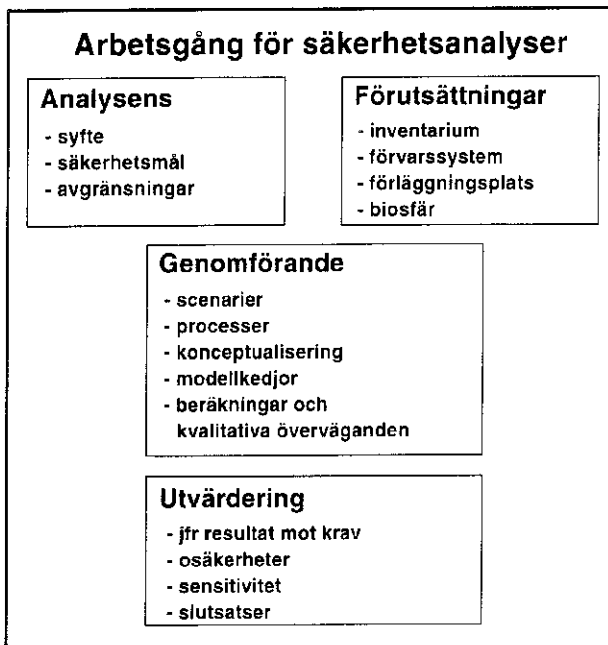
Oavsett om analysen omfattar hela förvaret eller delar av det eller om den syftar till att belysa en specifik funktion eller förvarets totala säkerhet måste den genomföras på ett systematiskt sätt. En komplett analys omfattar:

- Definition av analysens syfte.
- Definition av givna förutsättningar för analysen, d v s typer och mängder av radioaktivt avfall, förvarssystemet och dess dimensioner samt förvarets plats och miljö.
- Definition av analysens omfattning och avgränsningar samt av säkerhetsmålen.
- Klarläggande av såväl de sannolika som de mindre sannolika eller osannolika förhållanden för vilka systemet/anläggningen skall analyseras (scenarier).
- Klarläggande av de tidsberoende processer som vid olika scenarier är väsentliga för förvarets avsedda funktion.
- Definition av beräkningsmodeller för att kvantifiera förvarets funktion och modellernas kopplingar, där så kan ske.
- Kvantifiering av förvarets funktion och väsentliga funktionsförändringar.
- Kvalitativ analys av viktiga men ej kvantifierbara processer eller händelser som kan inverka på förvarets funktion.
- Diskussion av osäkerheterna i kvalitativa och kvantitativa delanalyser och en bedömning av deras tillräcklighet med avseende på den totala analysens syfte.

Arbetsgången för funktions- och säkerhetsanalyser återges i Figur 5.1-1, och har tidigare redovisats i FUD-program 1992 – kompletterande redovisning.

För att genomföra analyserna på ett systematiskt och spårbart sätt har metodikerna för de olika stegen diskuterats inom Sverige, i SKBs samarbete med de större kärnkraftländerna och i det internationella samarbetet. Med metoder menas här dels den allmänna systematik som tillämpas i arbetet, dels också de verktyg – numeriska modeller – som används för att kvantifiera de för säkerheten viktiga processerna i förvaret. De flesta av de metoder som idag tillämpas har utvecklats under en följd av år, främst under 1980-talet, och fortsätter att vidareutvecklas.

En större genomgång av systematik och verktyg för säkerhetsanalyser gjordes i oktober 1989 vid ett symposium arrangerat av IAEA, OECD/NEA, och CEC i Paris /5.1-1/. Erfarenheterna från detta symposium utvärderades och diskuterades i de arrangerande organisationernas



Figur 5.1-1. Blockschema för hur större funktionsanalyser och säkerhetsanalyser genomförs.

expertgrupper, och resultatet sammanfattades i en International Collective Opinion /5.1-2/. Man observerade där att

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

Man noterade också att insamlandet och utvärderingen av data från föreslagna lokaliseringsplatser är ett huvudområde inom vilket vidare insatser måste göras, samt att metoderna för säkerhetsanalyser kan och kommer att vidareutvecklas som följd av pågående verksamhet. SKB delar dessa synpunkter.

Med anledning av de kommentarer och synpunkter som erhöles på FUD-program 1992 och den komplettering som gjordes 1994, har SKB till FUD-program 95 gjort en sammanställning av de metoder som SKB idag har tillgängliga för att genomföra säkerhetsanalyser. Denna sammanställning återfinns i en separat rapport, SR 95 /5.1-3/.

Eftersom SKB planerar att redovisa säkerheten vid ett stort antal tillfällen, se kapitel 10, har det bedömts vara önskvärt att etablera ett standardiserat format för hur den långsiktiga säkerheten skall presenteras. Ett sådant skulle både underlätta en successiv uppdatering av säkerhets-

redovisningen i olika skeden och underlätta jämförelser mellan analyser för olika platser eller under olika arbetsskeden. Därför har SR 95 skrivits på ett sådant sätt att den dels kan utgöra en framtida mall för hur den långsiktiga säkerheten skall redovisas, dels utgör en redovisning av idag tillgängliga metoder och numeriska verktyg, inkl deras tillämpbarhet och kvalitet.

I SR 95 görs först en genomgång av säkerhetsredovisningens syften under olika skeden i utvecklingen av ett djupförvar och metoder tillgängliga för att genomföra analyserna, varefter den idag prioriterade förvarsutformningen redovisas. Därefter presenteras tillämpningen av SKBs scenariemetodik på denna utformning och de för säkerheten väsentliga scenarierna (beräkningsfallen) med där ingående processer av kemisk eller fysikalisk växelverkan. En detaljerad genomgång görs sedan av de verktyg, d v s numeriska modeller / konceptuella antaganden, som SKB idag har tillgängliga samt deras tillämplighet och kvalitet. Metodiken för modellkopplingar och genomförandet av beräkningarna illustreras med material som baseras på den prioriterade utformningen samt på ett platsspecifikt geovetenskapligt underlag från Äspö-laboratoriet och omgivande biosfär.

Det bör observeras att varken scenariegenomgången eller modellberäkningarna i SR 95 är fullständiga. De utgör en illustrativ metodredovisning. Speciellt den redovisade uppsättningen av scenarier/beräkningsfall utgör delar av den säkerhetsredovisning som håller på att tas fram inför tillståndsansökan för inkapslingsanläggningen. I takt med att projekteringen av anläggningarna för inkapsling och djupförvar fortskrider kommer förutsättningar, dataunderlag och beräkningar att revideras.

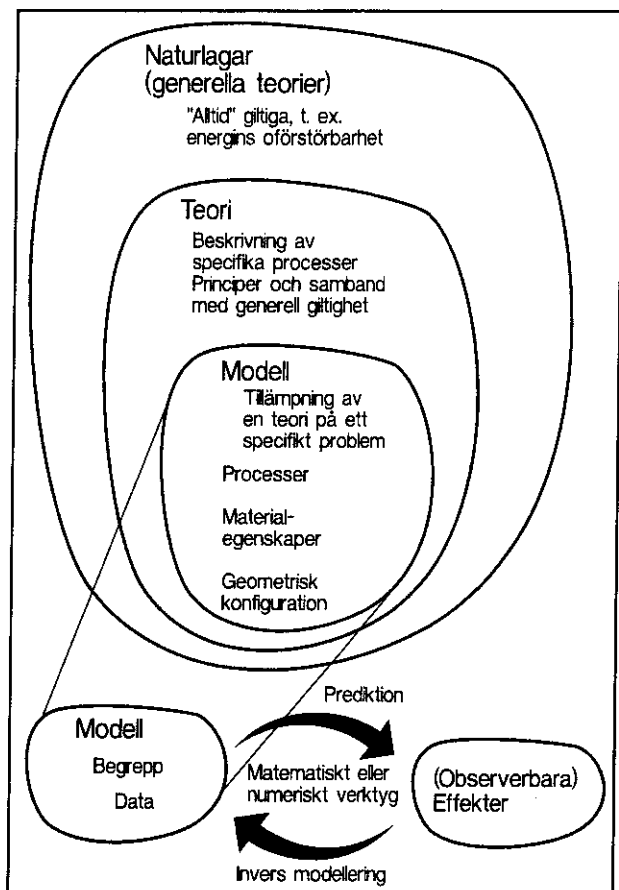
Vissa principiella metodikfrågor har dock lyfts upp till diskussion i detta FUD-program, se vidare avsnitten

- 5.1.2 Konceptuella och numeriska modeller,
- 5.1.3 Numerisk koppling mellan modeller och
- 5.1.4 Osäkerheter och validitet, samt
- 5.2 Scenarier.

Samtliga numeriska modeller som redovisas i SR 95 har utvecklats och fortsätter att vidareutvecklas på grundval av förståelsen för de i modellerna ingående processerna. Kunskapsläget inom dessa områden och metoder för insamling och bearbetning av data redovisas i de barriär- eller ämnesspecifika avsnitten 5.3 - 5.9 samt i kapitel 6.

5.1.2 Konceptuella och numeriska modeller

Olika beräkningsmodeller utgör viktiga verktyg i arbetet med funktions- och säkerhetsanalyser. I takt med den ökade beräkningskapaciteten hos datorer utvecklas alltmer kraftfulla verktyg för såväl deterministisk som statistisk analys av för säkerhet och funktion viktiga förhållanden och processer.



Figur 5.1-2. Schematisk struktur över naturlagar, teorier och modeller /5.1-2/.

Som framgår av analysgången identifieras i ett tidigt skede de processer som under olika betingelser kan transportera radionuklider från förvaret till biosfären. På grundval av tidigare genomförda funktions- och säkerhetsanalyser har en god förståelse byggts upp för de processer som är viktiga. Omfattande arbete har gjorts för att klargöra dessa processer och deras förutsättningar, samt hur de skall konceptualiseras och kvantifieras i numeriska modeller.

Olika syn på konceptuella modeller och deras roll i säkerhetsanalyserna presenterades och diskuterades i november 1993 i en workshop som arrangerades av OECD/Nuclear Energy Agency (NEA) /5.1-4/. En hierarkisk struktur över hur modeller kan betraktas i relation till naturlagar och teorier framgår av Figur 5.1-2.

SKB använder följande terminologi vid beskrivning av modeller:

konceptuell modell

som beskriver de antaganden och samband som utnyttjas för att simulera de skeenden eller förhållanden man avser modellera:

- **strukturmodell** som beskriver de geometriska eller dimensionella förhållanden som erfordras för modelleringen,
- **processmodell** som beskriver hur ev tidsberoende processer simuleras och deras randvillkor,
- matematisk modell** som beskriver en matematiskt formulerad approximation av den konceptuella (struktur/process)-modellen,
- numerisk modell** som definierar en numerisk approximation för kvantitativa beräkningar med den matematiska modellen,
- data** som definierar de i den matematiska eller numeriska modellen ingående parametrar/storheter,
- datorkod/-modell** som definierar den algoritm (för den numeriska modellen) som implementeras på en dator och vilken används för att generera beräkningsresultat.

En beräkningsmodell, matematisk, analytisk eller numerisk, 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.

I SR 95 kapitel 10 och 11 /5.1-3/ återfinns en genomgång av kunskapsläget för de beräkningssteg som ingår i en analys, eller de systemdelar med mer eller mindre kopplade processer som vanligen måste utvärderas, för att förvarets långtidssäkerhet skall kunna bedömas. De har uppdelats enligt följande:

Termisk utveckling
Bergets funktion
Kapselns funktion
Bentonitfunktion
Kemisk speciering
Grundvattenrörelser
Nuklidtransport närzon
Nuklidtransport fjärrzon
Biosfärsspridning
Dosberäkning

Där görs en genomgång av de för säkerheten väsentliga processerna och metoderna för deras kvantifiering. Ev tillämpade förenklingar och pessimistiska (konservativa) antaganden diskuteras. I den mån alternativa metoder finns tillgängliga för att beskriva en process diskuteras de väsentliga skillnaderna i konceptualisering eller modellering.

Kunskaper och erfarenheter om hur väl en viss numerisk modell kan beskriva den verklighet vi registrerar i fält diskuteras i specifika avsnitt i beskrivningen av modellerna. För transportkoderna NAMMU (fjärrzon) och NUCTRAN (närzon) samt för biosfärskoden BIOPATH har separata sk validitetsdokument tagits fram. Där har, för aktuell kodversion, uppgifter väsentliga för validitetsbegreppet sammanställts under följande rubriker:

- Grundläggande teori.
- Konceptuell modell.
- Numeriska metoder.
- Verifikation.
- Validering.
- Programdokumentation.

Avsikten med dessa validitetsdokument är att pröva om det är praktiskt möjligt att standardisera redovisningen, dels av den erfarenhet man har av att tillämpa modellen, dels av hur tillförlitliga olika modeller är för sina ändamål. En sådan standardisering skulle göra det enklare att jämföra erfarenheter av olika alternativa modellers användningsområde och validitet. Visar sig dessa validitetsdokument användbara kommer de flesta av SKBs viktigare numeriska modellverktyg att dokumenteras på detta sätt.

Kunskapsunderlaget för de fenomen som simuleras i processmodellerna – t ex diffusion, sorption, kolloidtransport etc – diskuteras i de avsnitt som beskriver barriärerna 5.3 - 5.5 eller i kemiavsnittet 5.6

Förutom de i SR 95 diskuterade processerna kan även andra processer behöva modelleras för att analysera specifika scenarier. T ex påverkan vid en istid eller risker för malmprospektörer om de ovetande skulle borra igenom förvaret. För sådana udda processer som inte generellt utnyttjas vid design eller säkerhetsanalyser har analysmodellerna inte standardiserats. Redovisning och granskning av tillämpade metoder för att kvantifiera eller begränsa effekterna av sådana processer måste göras separat.

SKB går nu in i ett skede då säkerhetsanalyser och säkerhetsrapporter direkt kopplas till tillståndsansökningar och beslut. Härvid kan modeller och metoder komma att behöva anpassas till den plats som analyseras eller till det specifika beslut som analysen skall ge underlag till. Sådan anpassning kommer att göras inför respektive säkerhetsanalys, se kapitel 10.

Utvecklingsläget för att på basis av platsundersökningar karakterisera en plats och representera den med en geologisk strukturmodell diskuteras i kapitel 7.

5.1.3 Numerisk koppling mellan modeller

Huvuddelen av beräkningarna i en säkerhetsanalys utgörs av kedjor eller nätverk av datormodeller, som kopplats samman. Under 1980-talet utvecklades ett hanteringssystem för sådana beräkningar kallat PROPER. Systemet möjliggör även probabilistiska analyser.

Utvecklingen av menyhantering och datorernas förmåga att hantera alltmer komplexa modellkedjor innebär emellertid att PROPERs hanteringssystem, baserat på textfiler, idag framstår som omodernt. För närvarande utvecklas därför ett mer automatiserat och grafikbaserat hanteringssystem under arbetsnamnet MONITOR-2000.

MONITOR-2000 kommer i första hand att ge följande fördelar jämfört med dagens system:

- Kvalitetssäkringen förenklas och förbättras, dels för att risken för misstag minskar, dels för att kvaliteten i dokumentationen ökar.
- Som en konsekvens av att dokumentationen förbättras kan redovisningen göras mer överskådlig och standardiserad.
- Man gör sig oberoende av en specialutbildad operatör för genomförandet av beräkningar med komplexa modellnätverk. Alla som sysslar med modellberäkningar kommer att kunna hantera även de komplexa beräkningarna.
- Avsevärda tidsvinster kan göras i arbetet med att definiera och dokumentera modellberäkningar. Genom att dessa moment inte längre kommer att utgöra en flaskhals i arbetsgången, vare sig tidsmässigt eller personellt, kan också fler beräkningsfall genomföras.

Utvecklingsarbetet planeras vara färdigt i november 1995 vilket innebär att MONITOR-2000 kan användas i kommande säkerhetsanalyser.

För att kunna använda de numeriska modellerna i kopplade modellkedjor anpassas nya modeller successivt till kraven i PROPER vad gäller hantering av indata och format för dataöverföring mellan modeller.

5.1.4 Osäkerhet och validitet

En samlad genomgång av osäkerheterna i analysen är en förutsättning för att kunna skapa en bild av den tilltro man har till analysens förmåga att beskriva verkligheten. De osäkerheter som förs in i analysen, vid de olika stegen i analyssekvensen enligt ovan, kommer att vara av olika karaktär och i varierande grad kvantifierbara.

En principiell genomgång av förståelse och hantering av osäkerheterna med hänsyn till deras roll i säkerhetsanalyserna görs i SR 95 kapitel 3 /5.1-3/ med underlagsrapporter. Osäkerheter i data och modeller för säkerhetsanalyserna diskuteras vid den redovisning som görs för de olika kunskapsområdena i SR 95 kapitel 10 och 11. Grundläggande osäkerheter i förståelsen av de för säkerheten väsentliga fenomenen och processerna samt för hur dessa konceptualiseras i matematiska modeller, avhandlas i de följande avsnitten 5.3 - 5.9.

Osäkerheter knutna till scenarier diskuteras i anslutning till den tillämpning av scenariemetodiken på förvarssystemet som redovisas i SR 95 kapitel 9.

Bedömningen av om kunskap och teknik för att hantera osäkerheter är tillräcklig – eller om de måste vidareutvecklas – är nära kopplad till hur förenklingar, pessimis-

tiska antaganden och säkerhetsmarginaler hanteras i varje specifik analys. På samma sätt som för annan metodik förväntas det inom osäkerhetsområdet finnas behov av kompletterande insatser kopplade till varje utvärdering och redovisning av säkerheten.

5.2 SCENARIER

5.2.1 Allmänt

Scenariemetodiken syftar till att identifiera och beskriva scenarier som skall utvärderas i säkerhetsanalysen. För att göra det behövs ett systematiskt sätt identifiera hur förvaret kan komma att utvecklas med tiden. Förvarets utveckling beror dels på de externa förhållanden eller händelser som kan påverka förvarssystemet, dels på de interna processer som kan uppkomma på avfallet, material som finns i barriärer och förläggingsberg, samt övriga material/föroreningar som kan komma att tas ner i förvaret.

Arbetet med att studera och utvärdera olika angreppssätt för att identifiera relevanta scenarier har pågått under många år. En genomgång av scenariemetodik publicerades 1992 av OECD/Nuclear Energy Agency /5.2-1/. Parallellt har arbete pågått i Sverige och andra länder för att identifiera de förhållanden/egenskaper i och kring förvaret, och de möjliga händelser eller processer (Features, Events and Processes = FEP) som kan föranleda att specifika scenarier behöver definieras. Detta material sammanställs för närvarande inom NEA.

Den specifika frågan om hur människans handlande kan påverka förvarets säkerhet har även tagits upp inom NEA /5.2-2/. Värdet av, och metoder för, att bevara informationen om förvaret över långa tidsperioder har studerats i Nordiskt samarbete /5.2-3/. SKB, och svenska myndigheter, deltar i detta internationella samarbete.

Det inledande steget i en säkerhetsanalys, efter att ha definierat det system som skall behandlas, är att identifiera de scenarier som har en sådan betydelse för förvarets funktion att de måste belysas i säkerhetsrapporten. Scenarierna skall täcka in ett brett spektrum av möjliga utvecklingsvägar och tillsammans skall de ge ett perspektiv på de säkerhetsmarginaler systemet ger. De olika stegen i processen för att ta fram dessa scenarier måste dokumenteras för att underlätta granskning och framtida genomgångar och uppdateringar. Höga krav kommer att ställas på fullständigheten i materialet och därmed på att alla relevanta frågor har tagits upp till behandling.

5.2.2 Huvudsakliga steg i metodiken för att ta fram scenarier

Arbetet att strukturera processen för att ta fram scenarier startade som ett gemensamt forskningsprojekt mellan SKI och SKB under 1988, och har redovisats i /5.2-4/. De egenskaper, händelser och processer (FEP) som kan vara tänkbara i ett avfallsförvar sorterades här i två grupper, antingen till det så kallade Processsystemet, bestående av "interna

FEP" som definierar förvarets funktion (inkl variationer föranledda av parameteravvikelser), eller till en grupp av "Externa FEP" vilka var och en kan påverka Processsystemet, och därmed ge upphov till olika scenarier.

Processsystemet definieras som en systematisk sammanställning av de fenomen (FEP) som behövs för att beskriva barriärfunktionerna och mekanismerna för radionuklidernas transport. För att genom Processsystemet kunna prognosera förvarets utveckling måste ingående FEP kunna kvantifieras genom mätdata, modellering eller uppskattningar.

Metodiken för att ta fram scenarier har följande huvudsteg:

- Identifiering av Processsystemet samt visualisering och dokumentering.
- Identifiering av initierande externa händelser eller extremfall.
- Val av scenarier och beräkningsfall att behandla i säkerhetsanalyser.

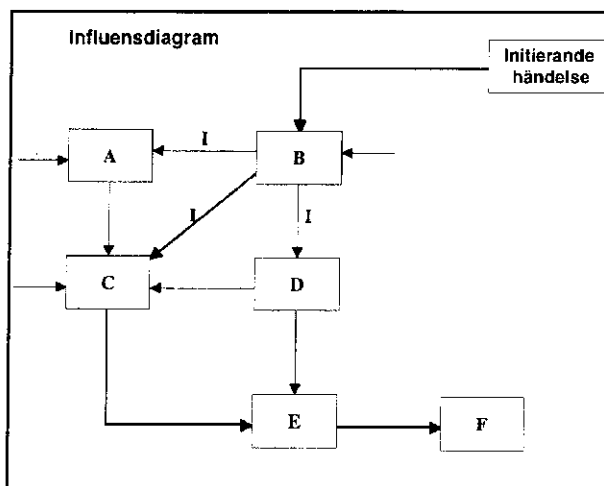
Identifiering av Processsystemet samt visualisering

Det första steget är att identifiera Processsystemet i text och med visuella metoder så att alla kända kopplingar mellan ingående processer visas. Kartläggningen av de FEP som ingår i Processsystemet kan göras på flera sätt och under 1991 – 1994 har försök gjorts med olika metoder. Framför allt har följande två metoder använts:

- Influensdiagram /5.2-5/.
- Rock Engineering Systems (RES) – metoden /5.2-6/.

Influensdiagram

I ett Influensdiagram representeras alla FEP av rutor. Kopplingar/interaktioner mellan olika FEP illustreras av pilar mellan dessa rutor, se Figur 5.2-1. Varje ruta och pil



Figur 5.2-1. Schematisk bild av ett Influensdiagram där en initierande händelse (External FEP) påverkar processerna.

i diagrammet har en identifikationskod och dokumenteras i databaser vilka är direkt åtkomliga från den mjukvara i vilken Influensdiagrammet produceras.

Influensdiagrammen medger en detaljerad genomgång av hur olika FEP kopplar till eller påverkar andra FEP i Processsystemet. Metodiken har provats i en studie rörande djupförvar "Annat långlivat avfall än använt kärnbränsle" /5.2-5/. Slutsatserna från denna studie var att det är fullt möjligt att genomföra den systematiska genomgången av Processsystemets olika FEP och att representera detta i ett Influensdiagram eller i flera deldiagram för olika systemdelar. De databaser som samtidigt produceras innehåller specifikationer av samtliga influenser samt noteringar av de bedömningar som gjorts för respektive influens. Visuellt är dock Influensdiagrammen komplexa och ger inte den snabba överblick av Processsystemet som skulle vara önskvärd.

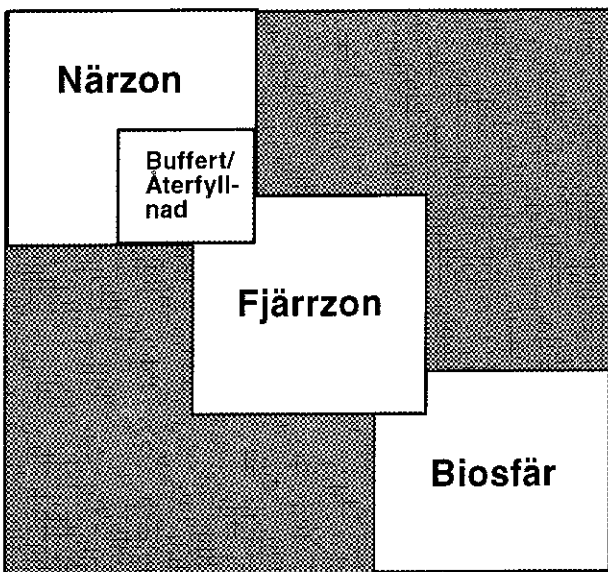
RES-metoden

RES-metoden innebär att förvarets viktigaste systemdelar med sina egenskaper (Features) identifieras och representeras på diagonalen i en matris. Matrisens övriga rutor kommer nu att representera interaktioner mellan dessa systemdelar, d v s av de processer som är involverade, och matrisen utgör Processsystemet.

För att inte göra matriserna alltför stora (eftersom behandlingen av matrisen då blir alltför komplex) delas Processsystemet upp i mindre delar, se Figur 5.2-2. I Figur 5.2-3 visas ett exempel på innehållet i en delmatris för fjärrzonsdelen av ett djupförvar.

Arbete pågår för närvarande med att koppla respektive interaktionsruta i delmatriserna till databaser på motsvarande sätt som tidigare gjorts för Influensdiagrammen i den nämnda studien rörande "Annat långlivat avfall".

Mer detaljerade beskrivningar av Influensdiagram och RES-metoden samt jämförelser mellan dem ges i /5.2-7/.



Figur 5.2-2. Exempel på uppdelning av det totala systemet i delmatriser.

Det nu pågående scenarierarbetet koncentreras på RES-metoden.

Identifiering av initierande externa händelser eller extremerfall

Genom Processsystemets RES-matris kan man

- dels göra en genomgång av de potentiella vägar som finns för olika interna störningar att propagera genom systemet via interaktionsrutorna,
- dels granska hur olika Externa FEP kan påverka Processsystemet och hur en ev störning kan fortplantas genom systemet (vid större störningar kan RES-matrisen behöva modifieras),
- dels ge en grafisk beskrivning av hur denna kedja av kopplade processer (interaktionsvägar) påverkar den långsiktiga säkerheten.

Detta underlag tillsammans med de externa initierande händelser (Externa FEP) som ligger utanför Processsystemet ger ett antal scenarier som kan vara intressanta att belysa i kvantifierande säkerhetsanalyser.

Det är dock nödvändigt att vara medveten om att både skapandet av FEP-listor för influensdiagram och valet av diagonalelement i RES-matriser är beroende av vår förståelse av förvarssystemet, och att både identifieringen av normal förvarsfunktion och extrema scenarier, kommer att innehålla ett mått av "expert judgement".

Val av scenarier och beräkningsfall att behandla i säkerhetsanalyser

Valet av de scenarier som slutligen skall tas in i säkerhetsanalyserna görs med hänsyn till de frågeställningar som säkerhetsanalysen är ämnad att besvara. Den ovan diskuterade kännedomen om känsliga störningsvägar ger ledning i valet.

Även den slutliga listan med scenarier och beräkningsfall utvalda för att ge en fullständig bild av "hoten" mot förvarets säkerhet (externa och interna FEPs) kommer att vara beroende av "expert judgement". Detta är en konsekvens av att varken dataunderlaget till eller förståelsen av de processer som behandlas i olika scenarier medger att varje scenario utvärderas med samma noggrannhet och lika omfattande kvantifiering. Underlaget till scenarieval kommer dock att kunna redovisas tydligare och vara bättre spårbart genom den metodik som utvecklas enligt ovan.

Förutom de scenarier, som genom olika systematiska angreppssätt avser att redovisa realistiskt möjliga utvecklingar av förvarets säkerhet, granskas även andra scenarietyper, ofta kallade "What if - Scenarios", "Worst Case - Scenarios" eller "Bounding Scenarios". Man kan t ex genomföra beräkningar under antagandet att ett utsläpp från närområdet hamnar direkt i biosfären utan att passera berggrunden, eller i beräkningar utesluta t ex dispersion eller indiffusion i bergmatrisen. Dessa scena-

FAR FIELD

process system - far field 1

- Interaction which should be part of the performance assessment
- Interaction present - influences on other parts of the process system in a limited or uncertain way and/or under special circumstances
- Interaction present - influences on other parts of the process system can be neglected

CONSTRUCTION/LAYOUT	1.2 Excavation method	1.3 Excavation method GROUTING Reinforcement	1.4	1.5 Displacement effects	1.6 Construction materials Stray materials	1.7	1.8 Drawdown effects	1.9 Repository depth Ventilation	1.10 Tunnel dimension	1.11 Ventilation Blasting gas Gas source	1.12	1.13 Industrial facility Dumps
2.1 Swelling ability Heat	2.2 BUFFER/BACKFILL/SOURCE	2.3 Buffer/backfill penetration into EDZ	2.4	2.5 Buffer into intersecting fractures	2.6 Colloid source Groundwater composition	2.7 Changed flow around holes Changed flow in tunnels	2.8 Reauration	2.9 Heat generation	2.10 Swelling pressure	2.11 Gas source	2.12 Source terms	2.13
3.1 Excavation method Amount of reinforcement	3.2 Volume for buffer/backfill swelling Rock fallout	EDZ	3.4	3.5	3.6 Changed IL, and a, Colloid and particulate generation	3.7 Changed permeability	3.8	3.9 Modified thermal diffusivity	3.10 Fractures affected	3.11 Indiffusion of air Transport path for gas	3.12 Changed IL, and a, K _g	3.13
4.1 Layout/construction method	4.2	4.3 Magnitude and geometrical extent	ROCK MATRIX/MINERALOGY	4.5 Fracture characteristics and infilling mineralization	4.6 Rock-water interaction	4.7 Matrix K Rock compressibility	4.8	4.9 Thermal properties	4.10 Genesis, tectonic history and rock type	4.11 Radon generation	4.12 Sorption Matrix diffusion	4.13 Land-use Potential human intrusion
5.1 Avoid major zones Constructability	5.2	5.3 Mechanical properties and fracture frequency	5.4 NATURAL FRACTURE SYSTEM	5.5	5.6 Dissolution of fracture minerals Colloid generation	5.7 Flow paths Connectivity Fracture aperture Storage caps.	5.8	5.9 Thermal properties	5.10 Stress magnitude and orientation	5.11 Transport path for gas	5.12 Molecular diffusion a, Sorption	5.13 Wells
6.1 Depth affected by redoxpot. Construction materials	6.2 TDS Ion exchange Illite/clay	6.3 Precipitation/bacterial growth	6.4 Groundwater rock interaction	6.5 Precipitation and dissolution of fracture minerals	GROUND-WATER CHEMISTRY	6.7 Density Viscosity	6.8 Density affects groundwater head	6.9 Heat conductivity	6.10	6.11 Chemically generated gas Microbially generated gas	6.12 Biogrowth and solubility Colloids and bacteria	6.13 Water-use Biotopes
7.1 Caiseter walling Construction methods	7.2 Saturation Bentonite erosion	7.3 Erosion	7.4	7.5 Erosion and sedimentation	7.6 Mixing	GROUND-WATER MOVEMENT	7.8 Equalization of pressures	7.9 Forced heat convection	7.10	7.11 Two-phase flow	7.12 Transport of dissolved gas Sorbing & non-sorbing species Hydrodynamic dispersion	7.13 Recharge and discharge
8.1 Construction methods	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6 Solubilities	8.7 Driving force due to pressure gradient	GROUND-WATER PRESSURE	8.8 Effective stress	8.9 Gas solubility Gas law	8.10	8.11 Potential effect on vegetation	8.12 8.13
9.1	9.2 Temperature in buffer backfill	9.3	9.4 Thermal expansion Thermal conductivity	9.5 Permafrost	9.6 Dissolution and precipitation of minerals	9.7 Viscosity	9.8 Density	TEMPERATURE/HEAT	9.10 Thermal expansion	9.11 Gas solubility Gas law	9.12 Kinetic effects	9.13
10.1 Design/layout Construction methods	10.2 Reaction force on swelling pressure Rock fallout	10.3 Mechanical stability Fracture aperture	10.4 Mechanical stability	10.5 Mechanical stability Fracture aperture	10.6	10.7	10.8 Confined aquifers	10.9 ROCK STRESSES	10.10	10.11	10.12	10.13 Mechanical stability
11.1 Ventilation problems	11.2	11.3 Opening of fractures Heat conduction	11.4 Fracturing Thermal properties	11.5 Fracture aperture	11.6 pH, Eh affected	11.7 Creation of 2-phase flow conditions	11.8 Capillary forces	11.9 Gas law	11.10	GAS GENERATION AND TRANSPORT	11.12 Colloid sorption on gas bubbles	11.13 Gas release
12.1 Design/layout	12.2	12.3	12.4	12.5	12.6 Changed concentration	12.7	12.8	12.9	12.10	12.11	TRANSPORT OF RADIO-NUCLIDES	12.12 Contamination
13.1 Siting Design/layout	13.2	13.3	13.4	13.5	13.6 Infiltrating water	13.7 Surface water recharge & percolation	13.8 Land use Cereals & soil driving force Hydraulic gradient	13.9 Climatic driving forces	13.10 External load Erosion	13.11	13.12	BIOSPHERE

Figur 5.2-3. Delmatriken avseende fjärrzonen i ett djupförvarssystem.

rietyper syftar, som namnen anger, till att belysa säkerhetsbetydelsen av olika barriärer eller fördröjningsmekanismer. Trots att scenariebeskrivningarna ofta är starkt förenklade och fysikaliskt orimliga kan de ge en övre begränsning av konsekvenserna. Dessa orealistiska scenarier används ofta för att på ett enkelt sätt belysa hur robust eller hur känslig förvarets säkerhet är för osäkerheter i olika barriärer eller processer.

5.2.3 Pågående arbete

Arbetet med att etablera en praktiskt användbar systematik och en spårbarhet i scenariearbetet fortsätter. Arbetsläget redovisas i SR 95 /5.1-3/ där det i avsnitt 3.3 görs en genomgång av olika sätt att etablera scenariesystematiken. I kapitel 9 tillämpas RES-metoden på det förvarssystem som nu definieras inför lokaliseringsprocessen och för tillståndsansökningar för inkapslingsanläggningen.

Systematiken i scenariearbetet skall göra det lättare att utvärdera om scenarievalet täcker de viktiga utvecklingsvägarna för förvaret, och om de för säkerheten väsentliga processerna identifierats. SKB bedömer att detta kan åstadkommas med många metoder. Avgörande för valet av metodik är om den uppfyller ställda krav, hur praktisk den är att tillämpa och vilken översikt den ger. Metodutvecklingen inom scenarieområdet fortsätter både nationellt och internationellt. Resultat och erfarenheter kan innebära att den rekommenderade metodiken eller tillämpningarna förändras.

5.3 ANVÄNT BRÄNSLE

För att radioaktiva ämnen skall kunna spridas från djupförvaret måste en läcka ha uppstått på kopparkapseln, till exempel genom korrosion eller mekanisk påverkan. Vatten kan då komma i kontakt med bränslet och vattenlösliga radionuklider kan frigöras från bränslet. För nuklider som till viss andel frigjorts från uranmatrisen under drift, t ex jod, kan detta ske utan att bränslet självt behöver påverkas. Annars kräver frigörelse av radioaktivitet att bränslet antingen löses upp eller korroderar i vattnet. Målet med forskningsprogrammet är att undersöka hur snabbt radionuklider frigörs från bränslet under olika förhållanden, som kan tänkas råda i djupförvaret och att beskriva frigörelsen med hjälp av lämpliga modeller.

Undersökningar av bränslets beständighet i grundvattnet pågått i Sverige sedan 1977. En översikt över resultat och data som erhållits inom ramen för SKBs program under senare år ges i /5.3-1/ tillsammans med en jämförelse med den databas som samlats under de senaste tio åren.

Flera olika modeller för att beräkna bränsleupplösningen har diskuterats under åren. Ansatserna sträcker sig från starkt konservativa, kraftigt förenklade modeller för beräkningar i samband med säkerhetsanalyser, till försök att fenomenologiskt rätt beskriva bränsleupplösningen.

Den enklaste ansatsen är att helt bortse från kinetiken för bränsleupplösningen och betrakta den som ögonblicklig. Utsläppet av radionuklider kommer då att styras av fissionsprodukternas och aktinidernas individuella lösligheter under förvarförhållandena. Denna beskrivning ger en extremt konservativ övre gräns för utsläppen från kapseln, och den ger långt ifrån en korrekt bild av bränsleupplösningen.

I SKB 91 gjordes ett försök att ta hänsyn till upplösningsskinetiken genom att låta frigörelsen av strontium vara ett mått på oxidationen av bränslematrisen /5.3-2/. Även denna modell var mycket konservativ, eftersom den frigörelsehastighet för strontium som användes var uppmätt i närvaro av syre från atmosfären. I djupförvaret kommer efter några hundra år endast oxidanter producerande genom radiolys att vara närvarande.

I den modell, som används av AECL Kanada, utgår man från att bränslematrisen förblir stabil och att lösligheten av bränslet självt styr frigörelsen av radionuklider /5.3-3/. Denna modell är troligen den mest realistiska i det längre tidsperspektivet. Det större aktinidnehållet i lättvattenbränsle, jämfört med CANDU bränsle, gör att effekterna av radiolys, framförallt α -radiolys, bör utredas ytterligare innan en liknande modell tillämpas för våra förhållanden.

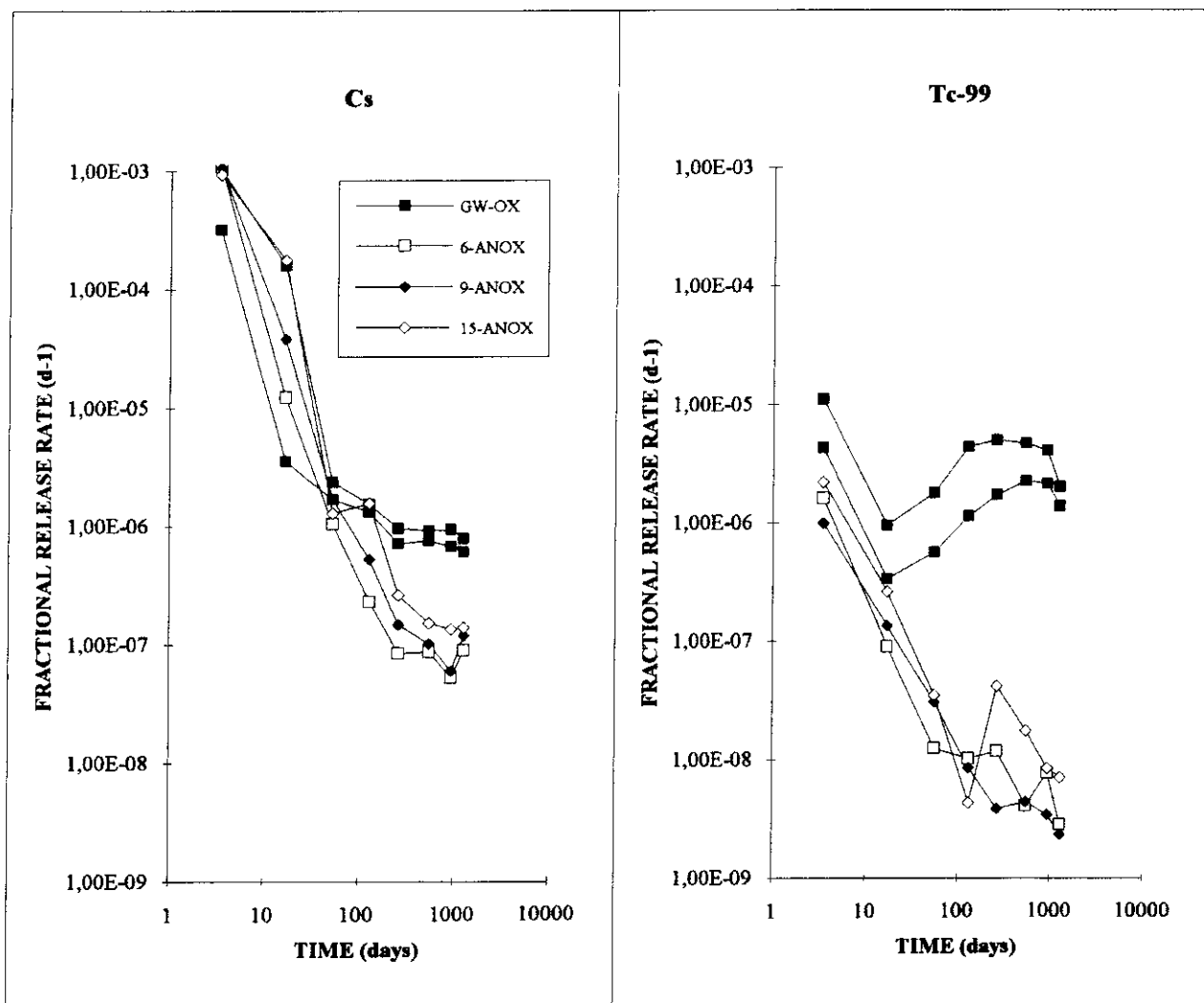
I detta avsnitt redogörs kortfattat för betydelsen av ett antal viktiga faktorer som bestrålningshistoria, mekanismen för matrisoxidation, grundvattenkemi, redoxförhållanden, sorption på buffertmassan o s v för lakning av använt kärnbränsle, och därigenom också för modellering av bränsleupplösningen.

5.3.1 Korrosion av använt bränsle

Analysmetoder

Vid Studsviks bränslelaboratorium har ett experimentprogram pågått sedan 1982. Korta bitar av bränsle och hölje har exponerats för korrosion i syntetiskt grundvatten under oxiderande och anaeroba förhållanden. Den filtrerade lösningen, materialet på filtret och material upplöst i den syra som används för att skölja lakkärnen har analyserats. Analysprogrammet har omfattat laserfluorescens (U), alfappektrometri (Pu, Cm), gammasppektrometri (gammastrålande fissionsprodukter) och radiokemisk separation och betasppektrometri (Sr, Tc). Resultaten har givit en god förståelse för bränslekorrosion och en översikt över resultaten i programmet har publicerats /5.3-1/.

Den möjlighet till multi-element analyser som ges av masspektrometri med induktivt kopplad plasmakälla (ICP-MS) kan ersätta alla andra tidigare använda metoder och dessutom ge data för andra radioaktiva element av mindre radiologisk betydelse. Analyser av dessa radionuklider kan vara av stor betydelse för att förstå korrosionsprocesserna. Ett ICP-MS instrument har varit i drift på Studsvik sedan 1992. Eftersom isotopsammansättningen i bränslet kan variera från prov till prov bero-



Figur 5.3-1. Frigörelsehastigheten per dag för andelen frigjort cesium (Cs) och teknetium (Tc-99) under oxiderande (GW-OX) och anaeroba (6, 9, 15 – ANOX) förhållanden.

ende på anrikning, utbränning och avklingning har en betydande databearbetningen av provrelaterade variabler gjorts /5.3-4/.

Den nya tekniken ger möjlighet att bestämma uranhalter med god precision och noggrannhet under både oxiderande och anaeroba förhållanden. Samma gäller för Np och Pu under oxiderande förhållanden. För anaeroba förhållanden däremot är precisionen lägre på grund av de låga halterna av dessa aktinider. Direkt analys av Am och Cm i laklösningen har gett otillfredsställande resultat på grund av dålig mätstatistik och osäkerheter i bakgrunds-nivån /5.3-5/.

Resultatet från mätningar av relativa frigörelsehastigheter för cesium och teknetium för de korrosionstester, som genomförts hittills, visas i Figur 5.3-1.

Areabestämning

I SKBs tidigare bränslekorrosionsarbete har lak-hastigheter uttryckts som andel av inventariet i vattenfasen. Detta ger en allmän bild av bränsleupplösningsprocessen. Lak-hastigheten är dock starkt beroende av den exponerade arean på bränslet, som i sin tur beror av flera faktorer relaterade till bränslets bestrålningshistoria. Den area av bränslet som är tillgänglig för inträngande grundvatten är en väsentlig parameter för att bestämma korrosions-hastigheten i absoluta termer. Experiment för att bestämma specifik bränslearea med BET teknik pågår. Reproducerbara värden för bränslearea i området 70-120 cm²/g har erhållits. Försöken att relatera dessa till bränslets utbränning /5.3-6/ ger dock inte tydliga samband.

Tabell 5.3-1: Kumulativ frigjord andel av inventariet efter fyra kontaktperioder. GS: gamma spektrometri. RC: radiokemisk analys. När > tecknet använts betyder detta att nukliden inte detekterades i första kontakten.

Nuklid	Mätmetod	Referensprov		"Power bump"-prov	
		13-1	13-2	13-3 33,0 kW/m	13-4 42,6 kW/m
Cs-133	ICP	$5,20 \cdot 10^{-3}$	$5,82 \cdot 10^{-3}$	$2,18 \cdot 10^{-2}$	$1,16 \cdot 10^{-1}$
Cs-137	GS	$5,02 \cdot 10^{-3}$	$5,5^7 \cdot 10^{-3}$	$2,08 \cdot 10^{-2}$	$1,12 \cdot 10^{-1}$
I-131	GS	NM	NM	$7,05 \cdot 10^{-3}$	$7,77 \cdot 10^{-2}$
Rb-85	ICP	$4,61 \cdot 10^{-3}$	$4,82 \cdot 10^{-3}$	$5,74 \cdot 10^{-3}$	$3,39 \cdot 10^{-2}$
Rb-87	ICP	$1,25 \cdot 10^{-3}$	$1,29 \cdot 10^{-3}$	$5,62 \cdot 10^{-3}$	$3,58 \cdot 10^{-2}$
Sr-89	RC	NM	NM	$1,70 \cdot 10^{-4}$	$1,79 \cdot 10^{-4}$
Sr-90	RC	$2,82 \cdot 10^{-4}$	$2,93 \cdot 10^{-4}$	$1,75 \cdot 10^{-4}$	$1,86 \cdot 10^{-4}$
Sr-90	ICP	$2,81 \cdot 10^{-4}$	$4,06 \cdot 10^{-4}$	$1,73 \cdot 10^{-4}$	$1,79 \cdot 10^{-4}$
Sr-88	ICP	$2,76 \cdot 10^{-4}$	$3,51 \cdot 10^{-4}$	$1,49 \cdot 10^{-4}$	$1,53 \cdot 10^{-4}$
Ba-138	ICP	$3,51 \cdot 10^{-4}$	$3,67 \cdot 10^{-4}$	$2,38 \cdot 10^{-4}$	$5,30 \cdot 10^{-4}$
Ba-140	GS	NM	NM	$>2,1 \cdot 10^{-4}$	$6,14 \cdot 10^{-4}$
Mo-98	ICP	$1,24 \cdot 10^{-4}$	$1,17 \cdot 10^{-4}$	$3,04 \cdot 10^{-4}$	$5,88 \cdot 10^{-3}$
Mo-99	GS	NM	NM	$>2,8 \cdot 10^{-4}$	$>7,5 \cdot 10^{-3}$
Tc-99	ICP	$6,50 \cdot 10^{-5}$	$6,27 \cdot 10^{-5}$	$7,44 \cdot 10^{-5}$	$1,60 \cdot 10^{-4}$
U	ICP	$2,01 \cdot 10^{-5}$	$2,36 \cdot 10^{-5}$	$5,64 \cdot 10^{-6}$	$1,20 \cdot 10^{-5}$

Matrisupplösning

För att kunna förutsäga frigörelsen av radionuklider från använt bränsle är det av stor betydelse att klarlägga hur och i vilken grad denna frigörelse är relaterad till upplösningen av UO₂ matrisen. Detta gäller speciellt strontium eftersom detta element har förslagits som en indikator för matrisupplösningen. Argument för och emot den hypotesen har dock förts fram /5.3-7/.

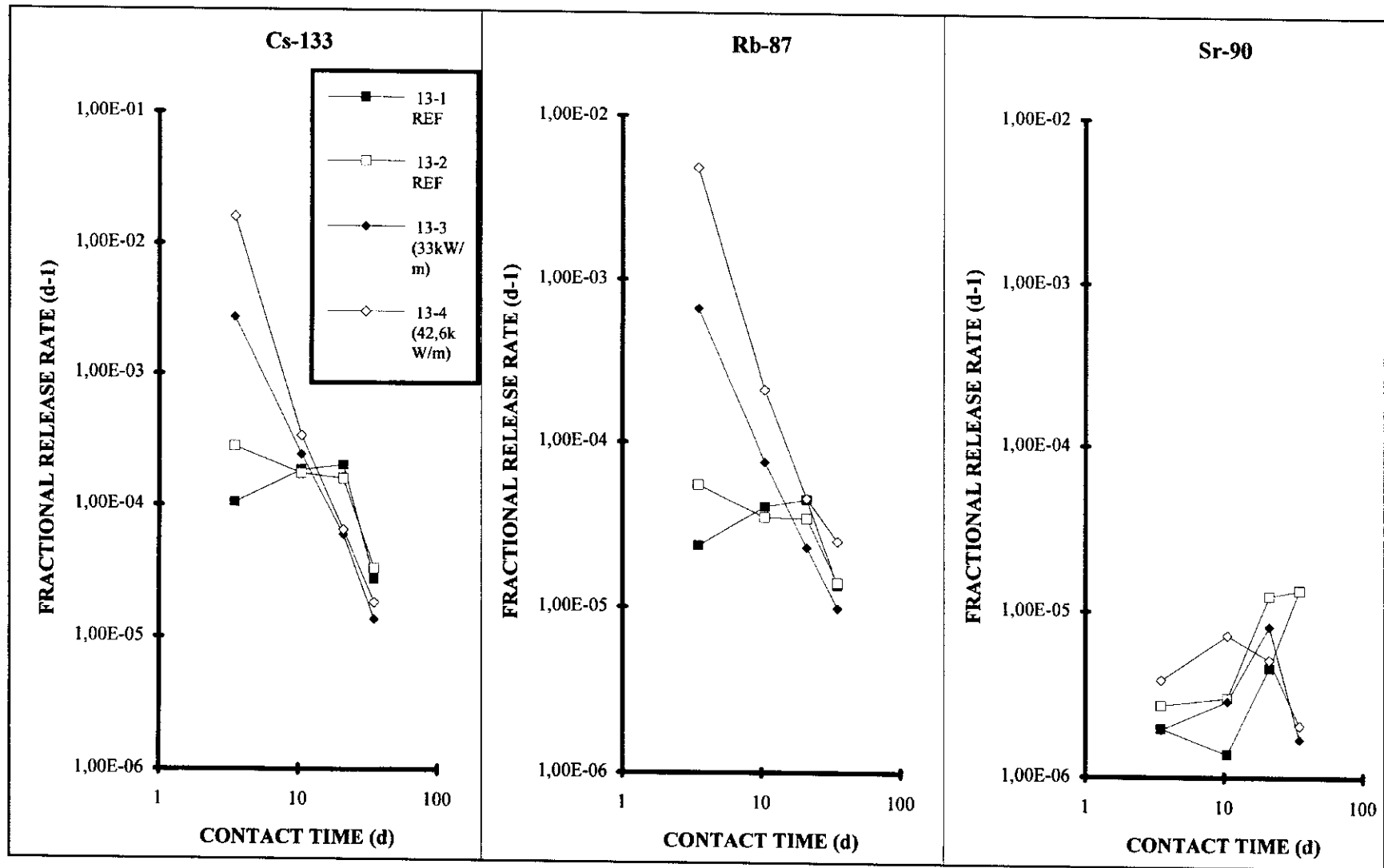
Observationer av frigörelsehastigheten för ⁹⁰Sr indikerar ett beroende av den migration och segregation som skett under bestrålningen /5.3-1/. Försök att identifiera sådan segregation med elektronmikrosondanalys har dock inte lyckats /5.3-8/. Det har föreslagits att den bakomliggande mekanismen skulle vara migration av ⁹⁰Sr:s modernuklider ⁹⁰Br och ⁹⁰Rb /5.3-9/. Detta styrks av att signifikanta mängder Rb detekterats på ytor av CANDU bränsle med hjälp av röntgenfotoelektron-spektroskopi /5.3-10/.

För att testa denna hypotes har migrationen av Sr studerats efter att bestrålat bränsle utsatts för en temperaturgradient, som varit brantare än normalt i en "power bump" test /5.3-11/. Därefter har halterna i lösning mätts i en serie korta lakexperiment och jämförts med referensprov. Resultaten från både ICP-MS och radiokemiska/radiometrisk metod visas i Tabell 5.3-1.

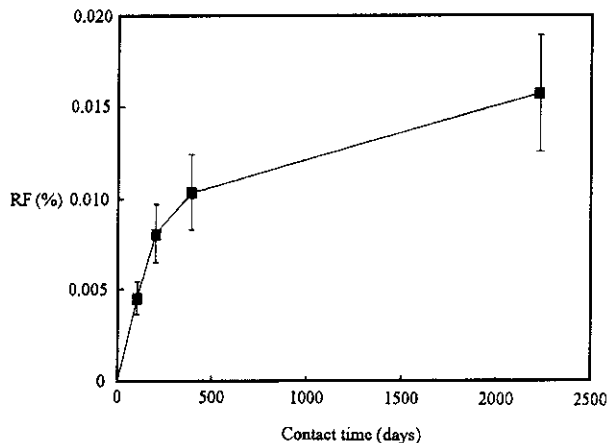
Frigörelsehastigheterna för Cs, Rb och Sr för referensprover och för prover från "power bump" testen visas i Figur 5.3-2.

Resultaten visar att rubidium migrerar i bränslet, men i mindre grad än vad cesium och jod gör. En, med hänsyn till de experimentella osäkerheterna, signifikant strontiummigration har inte kunnat påvisas. Av de övriga fissionsprodukter som studerades, Mo, Tc och Ba, visar endast molybden en signifikant högre frigörelse vid högre effektitet. Det är möjligt att detta orsakats av oxidation av bränslet under provberedningen.

Flödesreaktorer har använts i en mängd studier av kinetiken hos upplösning av svårlösliga ämnen /5.3-21/ och även i lakstudier av uraninit, SIMFUEL /5.3-22/ och bränsle /5.3-23/. Hos den här typen av reaktor kommer systemet att utvecklas till stabilt tillstånd om flödet, sammansättningen hos den inkommande vätskan, sammansättningen hos den fasta fasen och dess area håller sig konstanta. Ingen utfällning av sekundära faser kommer att ske eftersom reaktionsprodukterna spolats ut ur reaktorn innan någon mättnad uppstår. Ett viktigt kännetecken hos detta system är att den fasta fasen som är under observation inte kräver någon manipulering. När det yttre lagret har lösts upp, kommer ny yta kontinuerligt att utsättas för lakningsvätskan. Även diffusionen av lösningsspecies till ytan hos den fasta fasen är minimerad



Figur 5.3-2. Frigörelse hastigheten per dag för andelen frigjord aktivitet för referensprover (13-1 och 2) och "power bump" prover (13-3 och 4).



Figur 5.3-3. Frigjord andel ^{90}Sr efter olika kontakttider med bentonitlera utan tillsatser.

genom att använda tunna lager av fasta faser i reaktorn. Samma bränsle kan studeras under olika förhållanden genom att förändra lakningslösningen utanför reaktorn. En planering för att utnyttja ovan nämnd teknik i SKBs bränslestudier pågår.

5.3.2 Övriga komponenter i närområdet

Undersökningar av inverkan av bentonit på bränslekorrosion har pågått sedan andra hälften av 1980-talet. Preliminära utvärderingar av experiment med kontakttider på upp till ett år har rapporterats tidigare /5.3-12, 13/. Utvärderingen av frigörelsen av ^{90}Sr från bränsle i kontakt med kompakterad bentonit under sex år har också avslutats /5.3-14/. Figur 5.3-3 visar frigörelsen av strontium som funktion av tiden. Efter sex år är andelen frigjord Sr fem till tio gånger lägre än vid liknande experiment i frånvaro av bentonit. I experiment utförda med bentonit som innehåller metalliskt järn eller Fe(II) mineralet vivianit är andelen frigjord Sr lägre än i bentonit med metallisk koppar eller helt utan tillsatser.

Cesiums lakbeteende är annorlunda än strontiums och visar upp en initial puls av en snabbt frigjord andel /5.3-13/. Utvärderingen av cesiumlakningen i bentonit visar inte på någon signifikant ökning i frigjord andel över en sexårsperiod. Den lilla men tydliga ökningen i frigjord andel cesium som observerats i lakexperimenten utan bentonit /5.3-1/ döljs troligen av mängden initialt frigjort cesium, som i experimenten med bentonit finns kvar under hela experimentperioden /5.3-14/.

5.3.3 Modeller

Experimentella data från upplösning av använt bränsle och urandioxid under oxiderande förhållanden tyder snarare på kinetisk kontroll än på termodynamisk kontroll av proces-

sen. Den totala upplösningshastigheten i karbonathaltiga grundvatten kan relateras till följande processer:

- Initial snabb upplösning av ett redan oxiderat UO_{2+x} ytskikt. Denna initiala upplösningshastighet har bestämts experimentellt /5.3-15/.
- Oxidativ upplösning av matrisen i bikarbonatlösning. Processens hastighet beror av koncentrationen oxidanter och av koncentrationen bikarbonat.
- Utfällning av sekundära faser. Hastigheten på denna process beror av U(VI) koncentrationen, förhållandet mellan bränslearea och lösningsvolymen och av grundvattnets sammansättning.

Preliminära beräkningar tyder på att det är möjligt att utveckla en kvantitativ modell, som tar hänsyn till de ovan nämnda processerna. Överslagsberäkningar visar att det är möjligt att återge experimentella observationer. Ytterligare experiment och modelleringsarbete är nödvändigt för att stärka grunderna för modellen.

5.3.4 Naturliga analogier

Säkerhets- och funktionsanalyser av ett djupförvar baseras bland annat på beskrivningar av bränslets beteende över långa tider. Bränslelakexperimenten som syftar till kinetisk och termodynamisk modellering av bränsleupplösningen vid förhållanden, som råder i djupförvaret, kan inte utan vidare extrapoleras till mycket långa tider. Dessa tidsskalor kan överbryggas genom studier av omvandlingsprocesser i naturliga uraniniter under mildt oxiderande och reducerande förhållande.

Bränslets långtidsstabilitet är knuten till reaktionsvägarna för den oxidativa omvandlingen av bränslematrisen. Luftoxidation av naturlig uraninit /5.3-16/ visar att vid temperaturer upp till 300°C bildas bara U_4O_9 -oxider. Experiment- och litteraturdata kan inte styrka att $\alpha\text{-U}_3\text{O}_7$ bildas. Vid ytterligare höjning av temperaturen, eller partialtrycket av syre, nås troligen en mättnad av överskottssyre i den isometriska UO_{2+x} strukturen och den omvandlas i luft till U_3O_8 . I närvaro av vatten bildas uranoxidhydrater, som schoepit.

Studier av luftoxidation av bestrålat lättvattenreaktorbränsle visar en liknande oxidationsmekanism /5.3-17/. Först bildas kubisk U_4O_9 , som stabiliseras av fissionsprodukterna och når ett oxid/uran förhållande på upp till 2,4 med bibehållen fluoritstruktur. Fissionsprodukternas inverkan styrks av ett liknande beteende för Gd-dopat obestrålad UO_2 . Ytterligare oxidation tycks inte gå genom U_3O_7 . Detta gör det nödvändigt att revidera betydelsen av den fasen vid modelleringen av långtidskorrosionen av UO_2 matrisen i använt bränsle.

Upplösningsexperiment har utförts med naturliga uranfaser under olika redoxförhållanden, kombinerat med detaljerad karakterisering av de fasta faserna före och efter experimenten /5.3-18/, för att få underlag till en termodynamisk och kinetisk modell för långtidsoxidationen av uraninit. Dessa resultat kan tillämpas på

använt bränsles långtidsbeteende. Som en del av detta arbete har även lösligheterna av soddyit, uranofan och becquerelit bestämts.

5.3.5 Verksamheten i förhållande till mål i FUD-program 92

- Successivt vidareutveckla modellerna för säkerhetsanalysen 1996. - Arbetet med att bestämma betydelsen av α -radiolysen för bränslets oxidation/upplösning pågår och delresultat kommer att publiceras /5.3-19, 20/.
- Ta fram en realistisk modell för radionuklidernas frigörelse ur bränslet till slutet av 1990-talet inför ansökan om koncession för djupförvaret för demonstrationsdeponering. - Arbetet ansluter kontinuerligt till arbetet på α -radiolys.

5.4 BUFFERT OCH ÅTERFYLLNING

5.4.1 Funktionskrav

Buffert

Val av buffertmaterial och utformning av bufferten runt kapseln utgår ifrån de grundläggande kraven på funktionen som anges i avsnitt 4.3. Dessutom finns ekonomiska krav som avser god tillgång på den materialtyp som skall användas samt att förekomsten av accessoriska mineral i form av svavelmineral och organiska ämnen är liten. Kraven leder till att en svällande lera med hög smektithalt är lämpligast.

Uppfylls de grundläggande kraven uppnår man samtidigt en rad andra gynnsamma egenskaper som:

- begränsning av transport av korroderande fram till kapselns yta (diffusionstransport),
- sorption av radionuklider,
- endast diffusiv transport av radionuklider från en trasig kapsel till berget i närfältet,
- uttorkning och filtrering av mikroorganismer,
- stabilisering av deponeringshålets väggar,
- stabilisering av kemisk miljö (Eh, pH),

De olika funktionerna styrs av följande mätbara egenskaper hos bufferten:

- vattenhalt,
- hydraulisk konduktivitet,
- svälltryck,
- svällförmåga,
- skjuvhållfasthet,
- reologiska egenskaper,
- porvolym,
- diffusions- och sorptionsegenskaper,
- termisk ledningsförmåga,
- kemisk sammansättning.

Närmevärden för att uppfylla olika funktionskrav styr den sammansättning hos bufferten som är lämplig, de accessoriska mineral och föroreningar som kan accepteras, och inom vilka gränser bulktätheten efter deponering och vattenmättnad skall ligga. Sådana överväganden har legat till grund för valet av buffertmaterial i BMT-försöket i Stripaprojektet /5.4-1/.

Samverkan med närfältberget

Bergets betydelse för bentonitbufferten har analyserats i olika studier /5.4-2, 3/. Härvid har noterats följande krav på berget för att bufferten skall uppnå och bibehålla avsedd funktion:

- Berget förser bufferten med grundvatten så att vattenmättnad och svällning sker.
- Närberget har en sådan sammansättning att bufferten ej påverkas på ett sätt som leder till allvarlig cementering eller mineralomvandling.
- Berget innehåller ej diskontinuiteter av en sådan art att öppningar bildas i vilka bentonit kan penetrera och orsaka en väsentligt sänkt bufferttäthet i deponeringshålet.

Dessa krav bedöms kunna uppfyllas i vanligt förekommande svenskt urberg på de djup under markytan som är aktuella för djupförvaret. Praktisk erfarenhet har erhållits bl a genom Stripaprojektet /5.4-4/. Vattenmättnad och svällning kan dessutom underlättas genom att pressa bentonitblocken med högt vatteninnehåll och fylla spalterna mellan block/kapsel resp block/berg med vatten i samband med deponering.

Återfyllningsmaterial

Olika blandningar av bentonit och ballast är tänkt att användas vid återfyllning av tunnlar, bergrum och schakt. Nödvändig funktion hos dessa material är att:

- motverka utsvällning av bentonit från deponeringshål,
- förhindra eller begränsa strömning av vatten i tunnel och kring kapselpositioner,
- motstå kemisk omvandling under lång tid,
- ej medföra betydelsefull kemisk omvandling av buffert runt kapsel.

I de fall vattentransporten kring kapslarna inte påverkas av den hydrauliska konduktiviteten i vissa avsnitt av tunneln blir kravet på mekanisk stabilitet det viktigaste. Obladdad ballast kan då övervägas. Sådana tunnelsektioner kan behöva tätas i varje ände.

De egenskaper som bestämmer funktionen och som kan mätas är desamma för bentonit/ballastblandningar som för ren bentonit. En tillkommande egenskap av betydelse för återfyllningsmaterial är kompressibiliteten som bestämmer hur utsvällningen från deponeringshålen begränsas.

5.4.2 Utvecklingssteg och sammanställning av hittills vunna kunskaper

Kunskaperna om bentonitleras egenskaper som buffert runt kapseln har byggts upp under lång tid genom omfattande studier i laboratorier och i fält. Verksamheten har bedrivits stegvis och iterativt med följande inriktning:

- Grundläggande kunskaper om buffert:
 - Uppbyggnad av bred kunskap.
 - Utveckling av beräkningsmodeller.
 - Inventering av material.
- Analys av enskilda processer:
 - Samverkan med berg.
 - Samverkan med kapsel.
 - Beständighet.
- Analys av kopplade processer:
 - Funktion i djupförvar.

För närvarande pågår en sammanställning av hittills vunna kunskaper och erfarenheter från den bedrivna forskningen. Den kommer att omfatta tre delar, varav Del I, som behandlar grundläggande definitioner och metodbeskrivningar, är klar /5.4-5/. Del II koncentreras på materialbeskrivningar och Del III på sammanställning av modeller. Sammanställningen syftar till att redovisa enhetliga definitioner på fysikaliska och kemiska begrepp och fenomen när det gäller buffertar och återfyllningar, standardiserade och rekommenderade laboratorie- och fälttestmetoder samt matematiska modeller för beskrivning och prediktering av praktisk betydelsefulla processer och funktioner.

5.4.3 Olika bentonitmaterials egenskaper

Bentonitbuffertars materialstruktur har beskrivits kvalitativt i en sk generell mikrostrukturell modell (GMM) /5.4-6/. Denna bygger på att buffertmaterialet består av mald, torkad bentonit som vid kompaktering bildar en massa med slumpvis fördelning av bentonitkornen och med slumpvis storlek och form på mellanliggande porer. Vid vattenmättnad och efterföljande homogenisering fylls porerna först med vatten och sedan med bentonitgel, varvid slutprodukten blir en buffert med bentonitkorn med hög täthet som mellan sig har porutrymmen som är fyllda med en bentonitgel med lägre täthet. Skilda kvaliteter hos slutprodukter fås för Na-respektive Ca-baserade bentoniter. De gelfyllda porutrymmena antas utgöra de dominerande passagera för transporter i bufferten och GMM tjänar idag som hjälpmedel för att bedöma rimligheten i laboratoriebestämda transportparametrar för vatten och gas.

Masstransport i en vattenmättad bentonitbuffert är begränsad till diffusion. Det gäller såväl transport av lösta ämnen från t ex grundvattnet in mot kapseln som uttransport av radionuklider från en defekt kapsel. Diffusion är

en mycket långsam process och därför en viktig barriäregenskap hos bentonitleran. Det skyddar kapseln mot inverkan av skadliga ämnen från omgivningen och det är en extra barriär mot spridning av radioaktiva ämnen om kapseln fallerar.

För att prediktera degraderingen av buffert- och återfyllningsmaterial har en modell tagits fram som grundar sig på den arbetsmodell för omvandling från smektit till illit som bygger på Pyttes teorem /5.4-7/. Modellen innebär att degradering sker antingen i form av övergång från smektit till illit via blandskiktmineral eller genom nybildning av illit. I båda fallen antas förändringen vara av Arrhenius-typ, d v s styrd av aktiveringsenergin och temperaturen, men också beroende av tillgången på kalium. Tillämpningar på geologiska exempel (Kinnekulle, Hamra och Burgsvik) samt laboratorieexperiment /5.4-8/ stöder modellens giltighet och därmed slutsatsen om att illitomvandlingen i bufferten och återfyll med bergkross som ballast ej utgör ett problem i 100 000-års perspektivet om lämplig bentonitsort valts. Den huvudsakliga omvandling som bedöms kunna ske äger rum under perioden med förhöjd temperatur närmast efter deponeringen.

En kemisk påverkan som uppmärksammats i det löpande arbetet med modellering av bentonitens degraderingsförlopp är att saltanrikning kan ske i bufferten närmast kapseln i samband med bevättning då grundvattnet har hög elektrolythalt. Laborrietester, som gjorts med prover med låg vattenhalt från början, indikerar dock att fenomenet kan undvikas om tätheten hos den vattenmättade bufferten uppgår till ca $2,0 \text{ g/cm}^3$ och block med ursprungligt hög vattenmättnadsgrad används i kombination med tillförsel av vatten med låg elektrolythalt /5.4-9/

Resultatet av en inventering av olika buffertmaterial presenteras i /5.4-10/. Denna studie redovisar att med tillämpning av modellen för degradering genom omvandling av smektit till illit /5.4-11, 12/ bör lägsta, initiala smektithalt vara 50%. Studien visar att endast smektityperna montmorillonit och saponit med natrium som huvudsaklig adsorberad jon bör komma ifråga. Emellertid är hög initial smektithalt mycket värdefull för att ge effektiv självläkning och homogenisering av bufferten. Sådana bentoniter med en halt av montmorillonit av 70-90% och med natrium som dominerande adsorberad katjon finns kommersiellt tillgängliga i USA, Grekland och Italien. I Sverige finns ingen kommersiellt intressant bentonitfyndighet påvisad. Emellertid har Nämnden för Statens Gruveegendom (NSG) genom SGU undersökt förutsättningarna för exploatering av fyndigheter i Skåne och funnit indikationer på fyndigheter i brunnshål. De få leranalyser som gjorts visar att smektitiska lermineral förekommer i moderbergarten basaltuff. Mycket lite är emellertid känt om tuffernas utbredning och mäktighet.

Det preliminära valet av återfyllningsmaterial är blandningar av 10-20% bentonit och resten ballast som läggs ut och kompakteras på platsen. Av miljömässiga och ekonomiska skäl förordas en användning av det berg

som bryts i djupförvaret, vilket krossas till lämplig kornstorlek. Egenskaperna hos sådant material har undersökts och visat sig vara jämförbara med egenskaperna hos kvartssand /5.4-13/.

En teknik för bestämning av buffertmaterials värmeledningsförmåga har utvecklats och bestämningar har gjorts vid olika densiteter och vattenmättnadsgrader. Mätvärdena har jämförts med teoretiska förutsägelser och med data från fältförsök i Stripa /5.4-14/. Resultaten visar god överensstämmelse när bufferten är nära vattenmättnad men ej så god vid omättade förhållanden.

5.4.4 Beräkningsmodeller för olika funktioner

En generell modell för Termo-Hydro-Mekaniska (THM) processer i vattenmättad buffert har utvecklats /5.4-15/. Den kan tillämpas på bl a svällning hos buffert mot återfyllda tunnlar, sättning hos kapsel och inverkan av berg rörelser på kapselns integritet. Modellen är verifierad i laboratorieskala såväl som på fenomenen med volymkrympning under tryck och plastisk, volymetrisk töjning, som kan utvärderas när nu pågående långtidsförsök bryts under sexårsperiodens första hälft.

För THM-processer i omättad buffert är en preliminär modell framtagen som för vissa fall visar acceptabel överensstämmelse med experimentella data men som ännu har stora brister /5.4-16/. Den har tillämpats i det internationella DECOVALEX-projektet där den använts för beräkning av PNCs "Big Ben"-experiment. Modellberäkningarna angav att buffertmaterialet närmast värmaren skulle torka och krympa i volym. Försöket visade en god överensstämmelse vad gäller temperaturer och minskningen i vattenhalt. Då porvolymen inte mättes i försöken kunde krympningen inte utvärderas. Det uppmätta totala bufferttrycket var högre än det beräknade /5.4-17/.

För homogeniseringsförloppet har en numerisk modell skisserats och tillämpats på såväl ren bentonit som blandning av bentonit och sand med hjälp av modellen för vattenmättad buffert /5.4-18/. Modellen kan f n tillämpas i tvådimensionella geometrier.

5.4.5 Gastransport

Om vatten tränger in i kapseln kommer vätgas att bildas genom anaerobisk korrosion av järn. Den potentiella trycksättningen av kapseln samt gasens effekt på vattenrörelserna runt kapseln har studerats /5.4-19/ i syfte att klarlägga vilka mekanismer som styr vätgasstranporten från kapseln samt vilka konsekvenser denna transport har. Följande slutsatser drogs:

- Långtidseffekten av gasbildningen beror huvudsakligen på bildningshastigheten samt bentonitens förmåga att släppa igenom gas.

- Den mängd gas som kan lösas i vatten och transporteras bort med diffusion är ringa jämfört med förväntad bildningshastighet, vilket medför att gasfasflöde genom bentoniten förväntas vara den dominerande transportmekanismen.
- När gasen har passerat genom bentoniten finns tillräckligt med transportvägar för att gasen skall kunna fortsätta vidare genom berget mot markytan.

De viktigaste frågorna att besvara är därför vilken gastransportsförmåga bentoniten har och om någon permanent försvagning hos bufferten till följd av gastransport kan uppstå med tiden. Experiment har gjorts /5.4-20/ för att bestämma vid vilket tryck bentoniten öppnar för att släppa igenom gas. Man fann härvid att:

- gasen tränger igenom leran i ett fåtal porpassager, vilket medför att uttorkning orsakad av gas är ytterst ringa,
- leran öppnar vid ett tryck som motsvarar det hydrostatiska trycket plus 50-90% av svälltrycket vid de densiteter som är aktuella för djupförvaret,
- när trycket faller stänger leran och självläker.

Effekten av upprepade genomsläppsacykler studeras i pågående experiment.

5.4.6 Bakterier

Syre och sulfid är i praktiken de enda ämnen som kan tänkas korrodera koppar. Djupt grundvatten är reducerande och därmed helt syrefritt. Dessutom kan man visa att det syre som stängs in i förvaret i samband med förslutningen ganska snart förbrukas av de reducerande ämnen som finns både i återfyllnadsmaterialet (t ex pyrit i bentonit) och i berget (ferromineral och sulfider). Sulfid förekommer i djupa grundvatten, i låga halter. Grundvatten kan innehålla relativt mycket sulfat och bentoniten innehåller en hel del lösligt sulfat. Sulfat reagerar inte spontant med koppar och inte heller låter sig sulfat reduceras av de reduktanter som kan finnas i ett slutförvar, såvida det inte sker med bakteriers hjälp. Sulfatreducerande bakterier förekommer på aktuella djup och det är angeläget att påvisa vad det är som kan begränsa deras inverkan. En viktig begränsning är livsmiljön i bentonitbufferten.

Dessa frågor studeras såväl i laboratoriet (egna försök) som in-situ (samarbete med Kanadensiska AECL i deras URL-anläggning). Resultaten så här långt tyder på att bakterierna inte överlever. Om det visar sig riktigt så utgör bentoniten en barriär för mikroberna. En genomgång av mikrobernas betydelse för djupförvarets långsiktiga säkerhet återfinns i /5.4-21/.

5.4.7 Betong

Betong är ett mycket användbart material för konstruktion och förstärkning. Tänkbara användningsområden för ett

djupförvar är injektering, golvbeläggning, sprutbetong på väggar och tak, underjordsbyggnader, pluggning av tunnlar och schakt etc. Användningen av betong ger fördelar under byggande och drift av förvaret, men det är nödvändigt att utvärdera dess egenskaper på sikt och den betydelse betongen kan ha för den långsiktiga säkerheten. Modern cement har inte funnits så länge, men kunskapen om de mineral som bildas i härdad cement och porvattnets sammansättning har ökat väsentligt /5.4-22/.

5.4.8 Avklarade frågor och kvarstående frågeställningar

Den pågående sammanställningen av hittills vunna kunskaper och erfarenheter syftar till att utgöra ett preliminärt underlag för utformning och val av material. Därefter kommande utvecklingssteg omfattar:

- uppbyggnad av fördjupade kunskaper,
- fältförsök,
- optimering.

Dessa syftar till att redovisa ett detaljerat underlag för utformning och val av material i samband med analys av funktionen i djupförvaret på kandidatplatser.

Olika bentonitmaterials egenskaper

Teoretiska förklaringarna till buffertens funktion kan ges av en preliminär version av GMM. Det återstår att mer detaljerat beskriva bentonitens homogenisering efter vattenmättnad för omfördelning av vatten och bentonit mellan bentonitkorn med hög bentonittäthet och mellanliggande porvolym med låg bentonittäthet, samt för bentonit-ballastblandningar där motsvarande homogenisering sker i porvolymen mellan ballastkornen.

Temperaturbetingad omvandling av montmorillonit till icke expanderande illit kan predikteras med utvecklad modell. Eftersom processen är långsam och svår att säkert efterlikna i laboriemiljö utgör även naturliga analogier lämpliga verifieringsexempel. Några svenska sådana har studerats och andra, svenska och utländska, bedöms kunna ge kompletterande belägg för modellens riktighet för svenska djupförvarssammanhang.

Kunskapen om olika kommersiella bentoniters kvalitet är huvudsakligen kända genom information från återförsäljare och egna analyser av produkten. I samband med framtida val av kvalitet för djupförvaret återstår att fastställa vilken kvalitet som långsiktigt kan påräknas från leverantören.

Beräkningsmodeller för olika funktioner

Funktionen hos buffertmaterial med särskild tyngdpunkt på reologi och transport av vatten och joner i deponeringshål under vattenmättade förhållanden kan idag beskrivas och beräknas med utvecklade modeller. Dessa har verifierats genom laborieförsök såväl som på de två plastiska

förändringsprocesser som nämnts tidigare. För dessa pågår försök.

För omräknade förhållanden, d v s avseende processerna vid bevättning av buffert och återfyll, återstår att klargöra flera förlopp och randvillkor avseende vattenutbyte mellan närfältberg och buffert och vattenfördelning i buffert, för att tiden för vattenmättnad skall kunna beräknas med tillräcklig noggrannhet, i första hand för användning vid utvärdering av buffertförsök i Äspölaboratoriet och i andra hand för funktionsanalys av slutförvaringen. Termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska processer samverkar och deras inbördes kopplingar är avgörande för resultatet. Idag studeras beräkningsmodeller för termo-hydro-mekaniska förlopp som kopplade modeller medan kemiska processer beaktas separat.

Gastransport

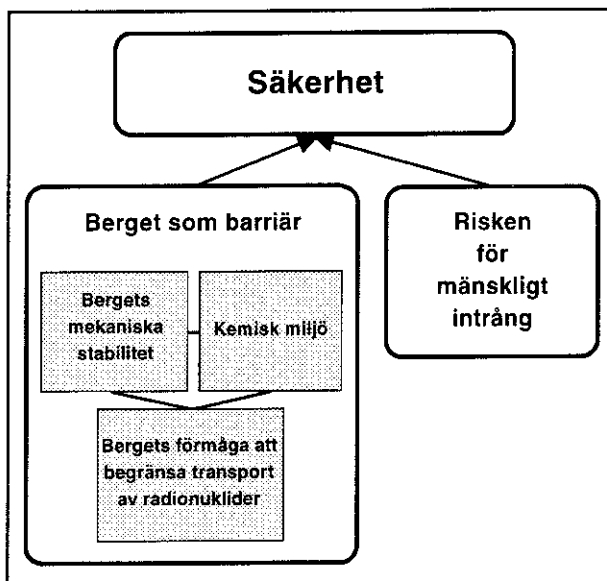
Transportmekanismen för gas genom en vattenmättad och svälld buffert är känd medan effekten av upprepade gastrycksökningar och gasgenomströmningar kräver ytterligare laborieförsök.

5.5 BERGGRUNDEN

5.5.1 Bergets roll i djupförvaret

I kapitel 4 redovisas de barriärfunktioner som eftersträvas i KBS-3-utförandet av ett djupförvar för använt bränsle och annat långlivat, radioaktivt avfall.

Det är några centrala egenskaper hos berggrunden, se Figur 5.5-1, som utnyttjas för att säkerställa ett djupförvars funktion och långsiktiga radiologiska säkerhet och det finns uppenbara kopplingar mellan dessa egenskaper:



Figur 5.5-1. Egenskaper och förhållanden i berggrunden som är av betydelse för ett djupförvars säkerhet.

- en mekanisk stabilitet för lång framtid,
- en kemiskt stabil miljö med ett grundvatten som ej bidrar till korrosion av kapselmaterialet eller omvandling av buffertmaterialet och som ger låg löslighet och stor fördröjning av ämnena i avfallet,
- en långsam och så långt möjligt oförändrad grundvattenomsättning som begränsar transport av ämnen som kan påverka avfallsprodukterna och återfyllnadsmaterialet negativt samt transport av radioaktiva ämnen.

Förutom ovanstående centrala geovetenskapliga egenskaper är det väsentligt att minimera riskerna för ett framtida intrång genom att:

- undvika bergvolymmer eller undvika närhet till volymer med potential för exploateringsbara metaller och mineral, energilagring och energiutvinning,
- förlägga förvaret på en sådan plats och ett sådant djup att risken för intrång genom borrhning (brunnar, prospektering, exploatering) blir mycket liten.

Sveriges urberg utgör en del av den Baltiska skölden som sträcker sig från Kolahalvön och Karelen över Finland och Sverige till Sydnorge. Merparten av det svenska urberget har en ålder av ca 1 700 000 000 år. Detta urberg erbjuder generellt sett en lämplig omgivning för säkra djupförvar med hänsyn till dessa nämnda eftersträlvade egenskaper hos berggrunden.

5.5.2 Geovetenskapliga data och osäkerhet

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 kärnbränsleavfallets hantering ställer ökade krav på kvantifiering av ingående processer och förutsägelser in i framtiden. Bergets stora heterogenitet innebär att generaliseringar inte kan göras utan att beskriva olika bergegenskapers variabilitet. Dessutom kan egenskaperna och deras variation bero av i vilken skala som ett visst problem betraktas.

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 vid en detaljerad kvantitativ beskrivning. Text gäller för den hydrauliska konduktiviteten i kristallina bergarter att skillnaden i medelvärden mellan olika bergarter är mindre än variationsvidden inom respektive bergart. I geovetenskapliga sammanhang utnyttjas därför såväl deterministiska som stokastiska beräkningsmodeller.

De geologiska aspekterna är huvudsakligen förknippade med förvarets funktion och säkerhet. Emellertid är geovetenskapliga förhållanden också av betydelse för

själva byggandet av förvaret. Det föreligger en koppling mellan förvarets utformning, dess säkerhet och dess placering i berget. Denna koppling behöver inte vara sådan att konstruktionsmässiga svårigheter alltid innebär långsiktiga säkerhetsrisker. Exempelvis kan lerfyllda zoner vara en anläggningsteknisk svårighet men ej ett uppenbart problem för framtida radiologisk säkerhet.

Ett djupförvars långsiktiga säkerhet bedöms i en mer eller mindre platsspecifik säkerhetsanalys, som bl a baseras på allmän geovetenskaplig förståelse för det aktuella området och i en skala som är relevant för förvaret och förvarsdelarna. Förläggningsplatsen, storlek någon km², skall inordnas i sitt regionalgeologiska sammanhang. Platskaraktiseringen kan vara såväl kvantifierande som kvalitativt beskrivande.

Oavsett i vilken skala man betraktar de säkerhetsmässiga förutsättningarna på förläggningsplatsen bör studierna vara förankrade i säkerhetsanalysens behov av relevant information. I översiktliga skalor blir bedömningar huvudsakligen av kvalitativ karaktär. Övergången mellan en kvalitativ bedömning i en översiktlig skala till en kvantitativ bedömning i en detaljerad skala är ej självklar.

Osäkerheter i geovetenskapliga data och information förknippade med

- mätnoggrannhet,
- respektive egenskaps heterogenitet och anisotropi,
- konfidensgrad för medelvärden och varians,
- undersökningsmetodernas riktningensberoende och dimensionalitet,
- undersökningsmetodernas volymsrepresentativitet, (skala),
- subjektivitet i tolkning.

Det är alltså viktigt att undersökningar i berg bedrivs stegvis i olika skalor och iterativt, dvs med successiv kunskapsuppbyggnad och alltmer detaljerad information.

5.5.3 Verksamhetens generella mål

Det geovetenskapliga programmet vid SKB omfattar bred kunskapsuppbyggnad inom geologi, geofysik, bergmekanik, geohydrologi, geokemi och grundvattenkemi. I programmet ingår även vidareutveckling av numeriska datormodeller och en stark koppling finns till utveckling av instrument och mätmetoder.

Arbetet är integrerat med insatser inom:

- Typområdesundersökningarna.
- Stripprojektet.
- Äspölaboratoriet.
- Säkerhetsanalyser.
- Naturliga analogier.
- Lokaliseringsprogrammets översiktsstudier, förstudier och platsundersökningar.
- Förvarsutformning.
- Alternativstudier av avfallshantering, främst djupa hål.

Den geovetenskapliga FoU-verksamheten vid SKB har som generellt mål

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

Viktiga delmål är därvid

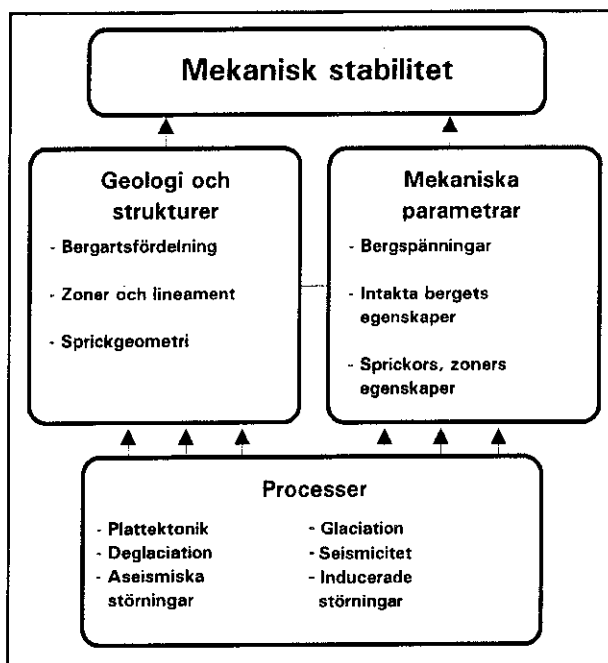
- att fördjupa förståelsen av de georelaterade processer som kan påverka den långsiktiga säkerheten hos ett djupförvar, samt att vidareutveckla förmågan att förutsäga sådana förändringar,
- att vidareutveckla modeller för beräkning av grundvattenflöde i sprickigt berg, för vattenflöden vid glaciation och deglaciation, för kopplade fenomen som temperatur, bergspänningar och hydraulisk konduktivitet samt för bergmekanik och kemi i en takt som anpassas till behovet vid analyser av kandidatplatsernas funktion och långsiktiga säkerhet,
- att lämplig mätteknik finns tillgänglig för högkvalitativ insamling av sådana data som erfordras för att karakterisera bergvolymen för anläggandet av ett djupförvar.

I de följande avsnitten presenteras kunskapsläge och erhållna resultat (1993 -1995), för mekanisk stabilitet, grundvattenkemisk miljö och bergets förmåga att begränsa nuklidtransport. Presentationen följer huvudsakligen den indelning i faktorer som redovisas och diskuteras i kompletteringsrapporten till FUD-program 92 /5.5-87/. Vidare framgår kunskapsläge om olika modellverktyg som används i SKBs verksamhet när det gäller hydrogeologi, transport av ämnen lösta i grundvatten och bergmekanik.

Vissa resultat från Äspö lyfts fram och diskuteras i den ämnesvisa geovetenskapliga kunskapsredovisningen nedan. En sammanhängande lägesredovisning av erfarenheterna från de FoU-arbeten som genomförts vid Äspö-laboratoriet t o m anläggningsskedet, kommer att ges ut i separata rapporter under 1995 och 1996. I anslutning till Äspö-laboratoriets program (se kapitel 12) ges dock en kortfattad resultatresumé. Erfarenheterna från plats- och detaljundersökningarna i Äspö redovisas i avsnitt 8.2.2.

5.5.4 Strukturgeologi och mekanisk stabilitet

Ett KBS-3 liknande förvar förutsätter ett omgivande kristallint urberg. I detta avsnitt behandlas **geologiska och**



Figur 5.5-2. Processer och faktorer inom berggrundsgeologi, strukturgeologi och rörelsebenägenhet som kan ha betydelse för säkerheten.

berggrundsstrukturella förutsättningar liksom **urbergets mekaniska egenskaper (rörelsebenägenhet)**. Figur 5.5-2 visar en schematisk indelning i ett antal **processer** som är tänkbara och där konsekvenserna beror av de strukturella och mekaniska förutsättningarna. Stabilitetsfrågor kan vara förknippade med naturliga rörelser eller inducerade rörelser beroende på förvarets utformning. Konsekvenser av naturliga rörelser kan vara beroende och/eller oberoende av förvaret.

Det övergripande syftet med det FoU-arbete som ägnas bergets stabilitet är att:

- möta de bergmekaniska funktionskraven så att djupförvaret kan anläggas och fungera stabilt under deponeringsfasen. Arbetsförhållandena måste vara säkra både för personal och för det avfall som skall hanteras.
- möta kravet att skjuvrörelser i berget i 100 000 års perspektiv inte skall skada kapslarnas integritet så att oacceptabel dos uppkommer.

Nedan ges en kortfattad resumé över studier som genomförts vid SKB åren 1993-1995. I övrigt hänvisas till SKBs Annual Reports /5.6-8 m fl/ och redovisningar i SKBs TR-serie.

Geologiska och berggrundsstrukturella förutsättningar

Berggrunden i Sverige kan indelas i tre stora enheter: Urberget, fjällkedjan (kaledoniderna) och den sedimentära berggrunden utanför fjällkedjan. Merparten av Sveriges urberg bildades genom veckningar, omvandlingar och magmainträngningar för mellan 500 000 000 och 2 500 000 år sedan. Det vi idag ser av den blottlagda urbergssytan låg vid bildandet på stora djup. Genom erosion har urbergets mäktighet minskat med 10-30 km.

Det svenska avfallsprogrammet har fokuserats mot magmatiska och högmetamorfa bergarter som värdmaterial för en försvarsanläggning. Bergarterna är ofta förgnejsade med granitisk sammansättning. Dessa bergarter studerades under de sk Typområdesundersökningarna /5.5-1, 2, 3, 4, 5, 6/.

Basiska bergartstyper, särskilt gabbro, har föreslagits som ett alternativ, då dessa kan erbjuda bättre sorptionsegenskaper och förutsättningar för självläkning av sprickor. Förekomsten av stora och homogena bergvolymerna med basiska bergartskroppar är dock starkt begränsad. Anläggningstekniskt är erfarenheterna från basiska bergarter ej väsentligt annorlunda än de från surare berggrund. För hydrauliska egenskaper visar tillgängliga resultat att basiska bergarter generellt sett är något mindre vattengenomsläppliga än graniter och gnejser. Spridningen inom en bergvolym är dock betydande. Från undersökningar i Taavinunnanen vet man t ex att granitiska gångar kan förekomma i gabbrokroppar och att gångarna har relativt sett betydligt högre hydraulisk konduktivitet. De relativt låga värmeledningsegenskaperna i basiska bergarter leder till att större försvarsvolymer måste tas i anspråk för att inte få för höga temperaturer i närområdet. En ytterligare negativ faktor är att gabbro ofta är intressant för utvinning av metaller (t ex nickel).

Sammanfattningsvis är det uppenbara svårigheter med att hitta stora homogena bergvolymerna med basiska bergarter för ett djupförvar. En jämförelse, som tar hänsyn till hydrogeologi, geokemi, anläggningsteknik, visar ej några uppenbara fördelar för gabbro i relation till granitiska bergarter /5.5-7, 8, 9, 10, 11/.

Det svenska urberget genomsätts av vissa storregionala mycket gamla deformationszoner /5.5-14/. Den sydvästsvenska gnejsprovinsen begränsas i öster av en zon som sträcker sig från Skåne till Värmland, den sk Protoginzone /5.5-12/. Inom den sydvästsvenska gnejsprovinsen förekommer den sk Mylonitzonen från norska gränsen i Värmland söderut via Värmlandsnäs till Varberg. Mylonitzonen är ett tecken på kraftiga deformationer i berggrunden för ca 1 000 000 000 år sedan. Öster om zonen förekommer huvudsakligen gnejser med magmatiskt ursprung och väster därom är ytbergarter vanliga. Tornquistzonen är en mycket långsträckt zon inom den Euro-asiatiska plattan. Zonen utgör gräns mellan den Baltiska Skölden och ett vidsträckt nedsänkt område i västra delen av kontinental Europa. I Skåne framgår Tornquistzonen med urbergshorstar och mellanliggande

djupa sänkor med sedimentär berggrund. Tornquistzonen uppvisar unga rörelser från kvartär tid /5.5-13/.

När det gäller strukturgeologiska element i ett regionalt perspektiv (vid sidan av ovanstående) förekommer olika begreppsmodeller. Berggrundens ytformer (morfologin) kan sammanställas och ligga till grund för en strukturell och tektonisk tolkning. /5.5-15/. Utifrån lineamenttolkningar baserade på t ex den svenska höjddatabasen och satellitbilder redovisas också ett flertal strukturmodeller /5.5-14, 60, 61, 105, 106/. Några modeller föreslår t ex att Sverige indelas i ett fåtal storregionala block avskilda med långsträckta skjuvzoner /5.5-16, 107/.

Bergmekaniska erfarenheter från underjordsanläggningar säger att lokalisering av djupförvaret till en gammal storregional deformationsstruktur inom den Baltiska skölden ej behöver uteslutas. Inom respektive deformationszon kan finnas bergvolymerna med lämpliga egenskaper. Sådant klarläggs i samband med platsundersökningar /5.5-80/.

Iakttagelser från sköldområden runt om i världen vittnar om att sprickor och sprickzoner, alltifrån detaljskala till det regionala perspektivet, förekommer med diskreta riktningkoncentrationer. De förskjutningsbelopp som kan bestämmas liksom deformationsstrukturernas längd och bredd visar ofta på fraktal dimensionalitet. Ett intensivt utvecklingsarbete pågår för att öka kunskapen om berggrundens uppsprickning /5.5-62, 63, 64/.

De konventionella geologiska och geofysiska undersökningsmetoderna kartlägger huvudsakligen brant stupande strukturer och deras uppträdande vid markytan. Det är emellertid önskvärt att ytterligare utveckla metoder för att kartlägga subhorisontella strukturer i berggrunden. Inom SKB pågår vidareutveckling av reflektionsseismiska undersöknings- och tolkningsmetoder /5.5-67/.

Urbergets mekaniska egenskaper

De låga temperaturer och tryck som råder i den övre delen av litosfären innebär att påfrestningar såväl i anläggningstekniskt som geologiskt tidsperspektiv kan resultera i uppsprickning. Ett sprödmekaniskt beteende kan vara bildning av sprickor, zoner eller propagering och reaktivering av redan existerande sprickzoner. Sprödmekanisk deformation kan förekomma i alla skalor.

De hållfasthetstekniska teorierna för den intakta kristallina berggrunden är relativt väl utvecklade och prövade i laboratorieskala /5.5-16, 17, 18, 19/. När en spricka eller zon väl har bildats kontrolleras den fortsatta rörelsen av friktion snarare än av det intakta bergets egenskaper. Olika empiriskt grundade parametrar förekommer för att beskriva de hållfasthetstekniska egenskaperna hos sprickor /5.5-20/. Viktiga egenskaper hos den enskilda sprickan är exempelvis andelen kontaktyta, sprickplanens råhet, rörelsens nedmalning, fyllnadsmaterial, normalspänningens fördelning och storlek m h t vätske-tryck, etc.

Mekaniska karaktäristika för större diskontinuiteter som sprickzoner är relativt okända. En sammanställning av befintlig information har genomförts /5.5-21/ baserad på observationer från begränsade delar av zoner eller från storskaliga laständringar främst inom gruvindustrin. Kunskapen är väsentlig både ur anläggningsteknisk och säkerhetsanalytisk synvinkel. Studien konstaterar bl a att antagandet om plana zonstrukturer med enhetlig funktion i beräkningsmodeller är tvivelaktigt och att zoners geometri och morfologi bör representeras mer realistiskt.

Kopplingar mellan mekaniska egenskaper och termiska, hydrauliska egenskaper i ett djupförvar är väsentliga att känna till. Den termo-mekaniska kopplingen är relativt väl utredd medan konstitutiva samband mellan mekaniska och hydrauliska egenskaper i sprickor är under utveckling /5.5-22, 23, 24/.

Geodynamiska och mekaniska processer

Stabiliteten i ett djupförvar påverkas såväl av geologiska processer som av inducerade rörelser p g a förvarets utformning /5.5-30/.

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

En genomgång har gjorts av de olika tektoniska regimer som den Baltiska skölden varit utsatt för under de senaste 1 200 000 000 åren /5.5-25/, med fokus på olika förhärskande "lastfall" och de till dem hörande spänningsfälten. Nuvarande urbergsyta uppvisar sprickmönster och heterogeniteter som formats och utvecklats under många hundratals miljoner år. Det är i detta sammanhang värt att påpeka att sedimentära bergartslager under Devon-Trias täckte större delar av Sverige med upp till 3 km mäktighet. På urbergsytan förekommer vanligen sprickmönster med fyra till fem dominerande sprickriktningar. Dessa har uppkommit som skjuv- och/eller tensionssprickor. Spänningsfältet har sedermera genom år-miljonerna varierat till riktning och storlek. Analyser visar att den uppspruckna berggrunden vid storregionala påkänningar har deformerats längs redan existerande sprickor och zoner. Eventuella aktiva laster under den kommande 100 000 års perioden kommer alltså sannolikt att reaktivera gamla zoner och sprickor. Den nuvarande tektoniska regimen med relativt passiv respons till den Mitt-Atlantiska oceanbotten-spridningen är en lugn period (anorogen) för den Baltiska skölden.

I Figur 5.5-3 framgår största huvudspänningen från ostörda mätningar på nivåerna 400 - 1000 m /5.5-31/. Spänningsbilden med en huvudsaklig kompression i nordvästlig riktning styrker effekten av den Mitt-Atlantiska oceanbottenspridningen på bergspänningarna i Sverige. Likartade slutsatser erhålls även från fokalpansanalyser av seismiska händelser i Baltiska skölden /5.5-48, 49, 50/.

Detta nuvarande storregionala tektoniska tillstånd, som initierades för ca 50 000 000 år sedan när Atlanten började bildas, förutsätts bestå under de kommande 100 000 åren /5.5-26/. Emellertid måste man, när det gäller spänningssituationen, beakta förväntade förändringar som orsakas av glaciationer och deglaciationer /5.5-27, 28, 29/.

Under senare år har dateringsteknik utvecklats för att bestämma när den senaste påtagliga rörelsen kan ha förekommit i enskilda sprickor eller zoner. Exempel på dateringsmetoder är paleomagnetism, isotopteknik, elektronspinning (ESR) och petrografisk utvecklingshistorik. En jämförande studie med olika metoder har tillämpats på sprickfyllnadsmaterial från Äspölaboratoriet /5.5-30/. Studien har gett värdefulla erfarenheter om provtagningsteknik, mätnoggrannheter och representativ tidsupplösning. I det aktuella projektet ansågs K-Ar analyserna vara mest tillförlitliga och tolkningarna innebär att senaste betydande förkastningsrörelser skulle förekommit för mer än ca 300 000 000 år sedan. Inom snar framtid kan man förvänta sig att olika dateringsmetoder för sprickors aktivitet blir värdefulla verktyg när det gäller att belysa bergets långsiktiga stabilitet.

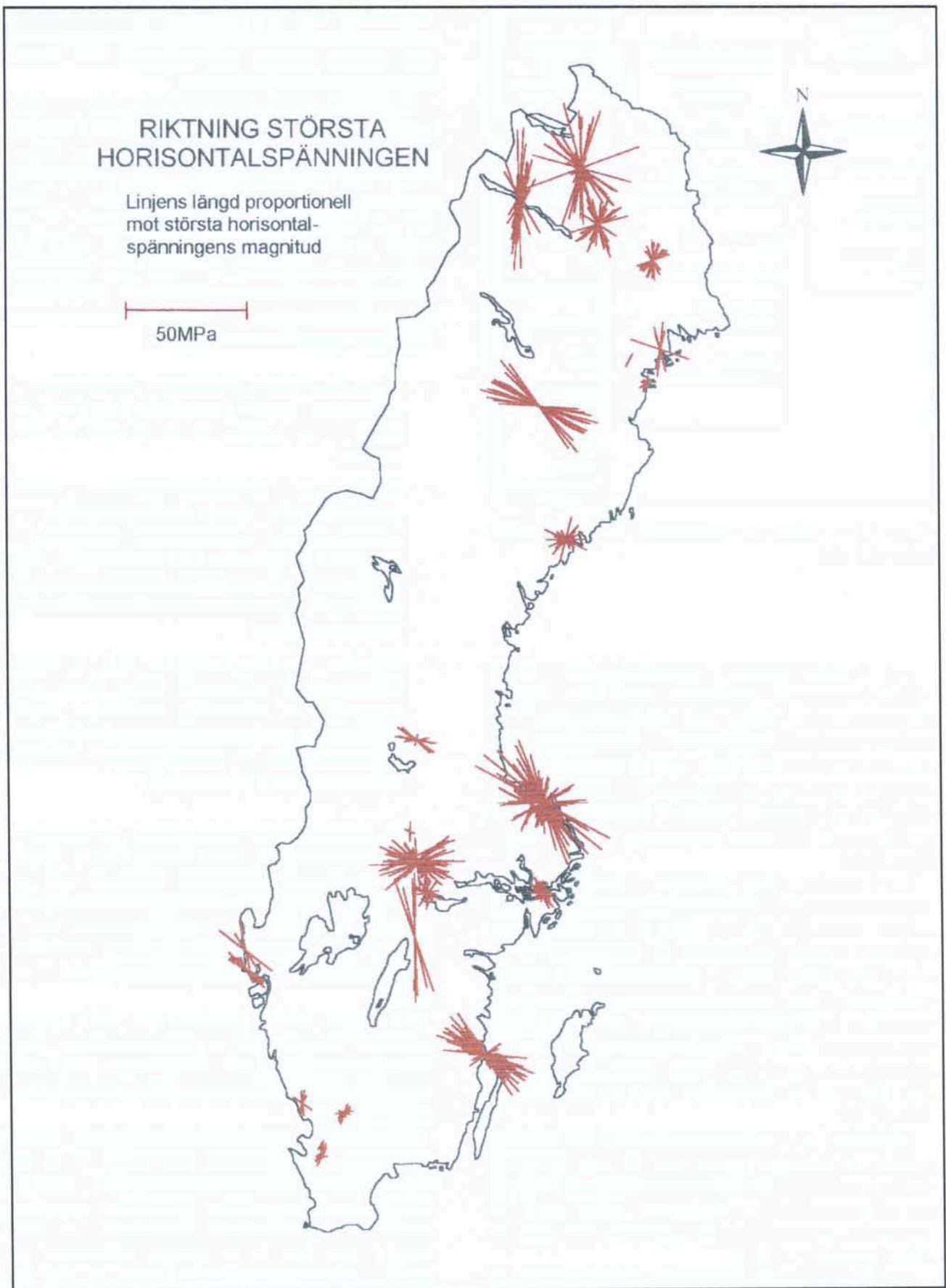
Glaciationer kan påverka säkerheten i ett djupförvar. I samarbete med Teollisuuden Voima OY (TVO) har SKB inventerat det internationella kunskapsläget om och när framtida istider förväntas och vilka förändringar i geosfären som då kan inträffa /5.5-27/. Härvid är bl a mekaniska frågeställningar, grundvattenhydraulik och grundvattenkemi intressanta.

SKB har låtit utveckla en numerisk glaciationsmodell över Skandinavien. Den tredimensionella modellen är tidsberoende och inkluderar termomekanisk koppling /5.5-32/, se Figur 5.5-4. Glaciationsmodellen drivs av förändringar i lufttemperaturen och den beräknar ismassans tillstånd på en förutbestämd topografi och hur berggrunden påverkas mekaniskt. Till modellen har även kopplats en enkel grundvattenflödesmodell /5.5-33/ som gör det möjligt att genomföra översiktliga och regionala grundvattensimuleringar under såväl glaciations- som avsmältningsskede, se vidare avsnitt 5.5.9.

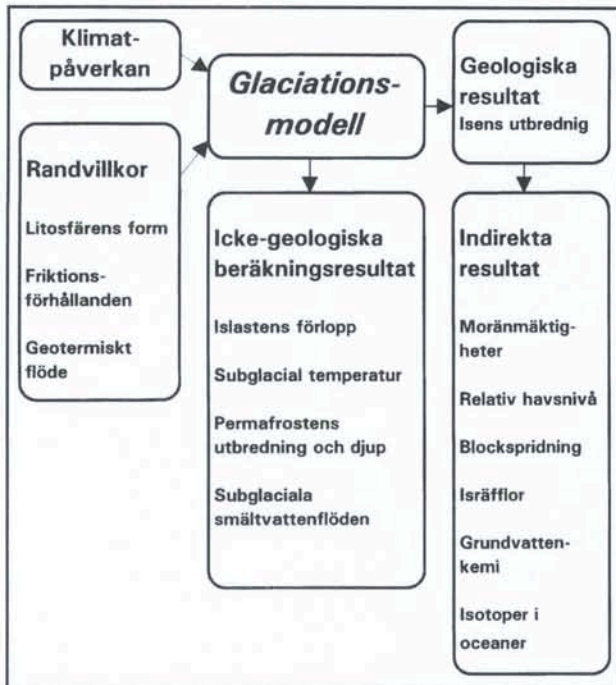
Tidigare stabilitetsberäkningar med en islast och där hänsyn tagits till förändringar i vattentryck, visar att eventuella rörelser tas upp i redan befintliga zoner. Vid ett beräkningsexempel baserat på data från typområdet Finnsjön är rörelsebeloppen ca 0,05 m vid ett normalfall. Vid extremsituationer med låga in-situ spänningar skulle rörelsebelopp av ca 0,5 m kunna erhållas i zoner. Det förutsätts att kapslar ej deponeras i sådana zoner /5.5-34, 35/.

Den nämnda glaciationsmodellen skall göra det möjligt att ytterligare belysa förutsättningarna för reaktivering i zoner och eventuell hydraulisk uppsprickning av berget p g a höga vattentryck vid en glaciation.

Landhöjningen efter den senaste nedisningen är en påtaglig geologisk process i Sverige, speciellt utmed Västerbottens kust där landet relativt Bottenhavet höjer sig med drygt 9 mm per år.



Figur 5.5-3. Bergspänningsmätningar på nivåerna 400 - 1000 m under markytan i Sverige (från /5.5-31/).



Figur 5.5-4. Indata och resultat från SKBs istidsmodell (efter /5.5-32/).

Vid Weichselglacialens avsmältningsskede (för ca 18 000 år sedan) var världshavets yta ca 120 m lägre än idag och havsytan började stiga (eustatisk höjning). I och med det varmare klimatet tillfördes stora smältvattenflöden till oceanerna. När inlandsisarna successivt smälte minskade isens tryck på jordens krusta och en landhöjning började (isostatisk höjning). Den tidigare högsta kustlinjen och Östersjöns utvecklingsstadier framgår i Figur 5.5-5.

Sett i ett översiktligt perspektiv har landhöjningen varit och är en relativt kontinuerlig process i rummet och i tiden. Inom den yta som täcks av ett djupförvar är skillnader i landhöjningstakten helt försumbara för förvarets mekaniska stabilitet. Utifrån detaljerade kvartärgeologiska studier är det emellertid möjligt att analysera eventuella strandlinjeförskjutningar som skulle kunna vara tecken på lokala postglaciala rörelser i befintliga sprickor eller zoner. SKB stöder några sådana studier som väntas bli avrapporterade inom det närmaste året /5.5-37, 38/.

Kunskapen om landhöjningsprocessen kan förväntas komma att fördjupas genom data från det nyinrättade GPS-nätet (GPS = Global Positioning System). I Sverige har nyligen ca 20 fasta mätstationer tagits i drift. För närvarande pågår intrimning, kalibrering och analys av mätnoggrannhet /5.5-39/.

Neotektoniska och postglaciala rörelser är föremål för ingående studier. Med neotektoniska rörelser menas vanligen förskjutningar som ägt eller äger rum under nuvarande tektoniska regim, dvs under den tid då Atlanten funnits. Eventuella rörelser efter den senaste de-

glaciationen kallas för postglaciala. Det är väsentligt att utvärdera om nämnda rörelser kan leda till ny uppsprickning eller allvarligt förändrade hydrogeologiska eller kemiska förutsättningar för ett djupförvar.

Postglaciala förkastningar i den norra delen av Baltiska skölden har varit kända och föremål för undersökningar under ca 20 år /5.5-40, 41/. Under perioden 1986 - 1992 utförde SKB ett omfattande geovetenskapligt forskningsprogram i Lansjärvsområdet, ca 150 km norr om Luleå. Fältstudierna koncentrerades till vissa avsnitt av förkastningarna och omfattade även provgropsundersökningar /5.5-42/. I juni 1991 arrangerades en exkursion med internationella experter till området. I sammanfattande rapporter /5.5-43, 44/ inklusive expertutlåtanden konstateras bl a följande:

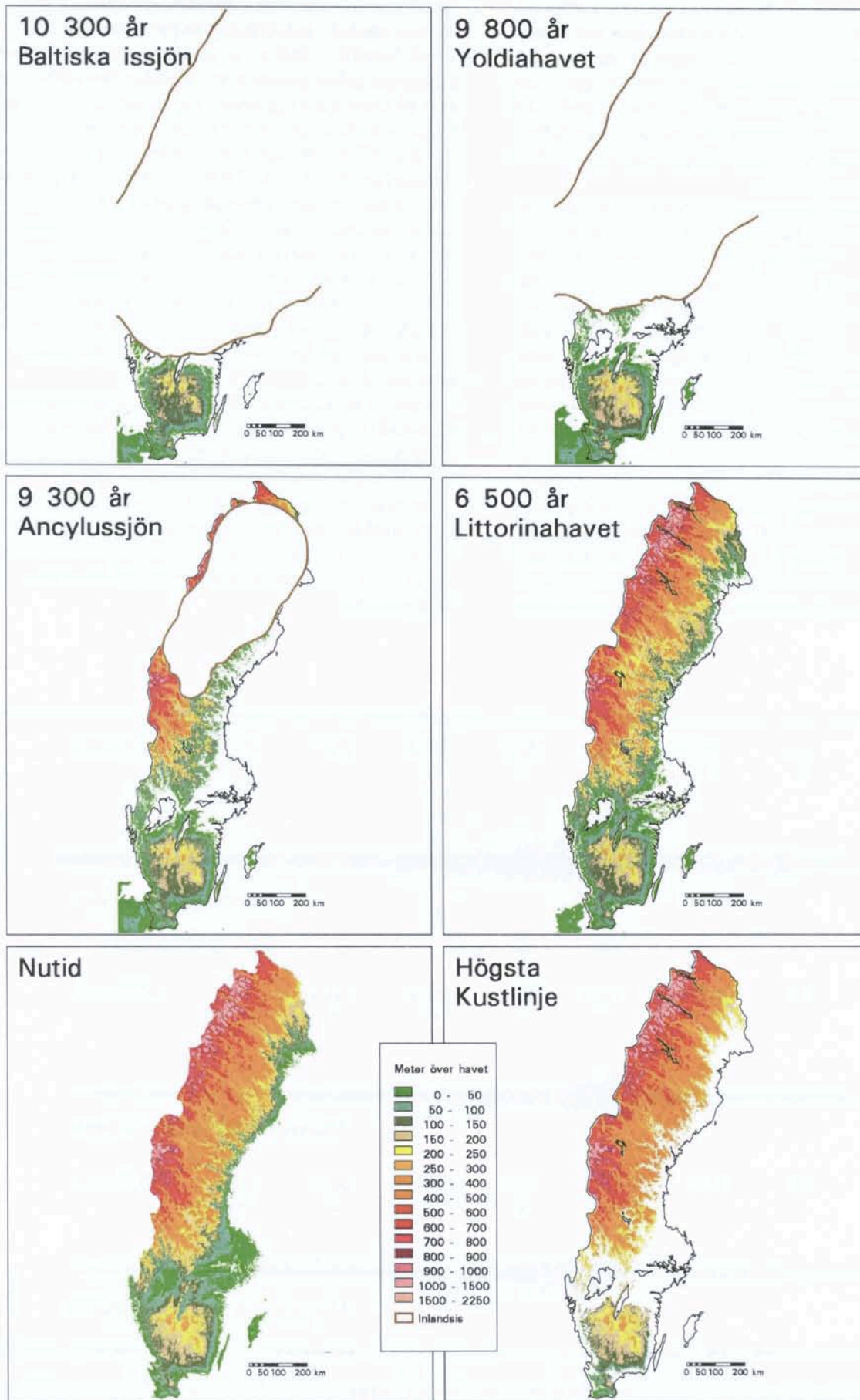
- De postglaciala förkastningarna är huvudsakligen reaktiveringar av äldre dominerande zoner, men förekomst av nya sprickor till en viss liten del kan ej uteslutas.
- Orsakerna till de postglaciala rörelserna är sannolikt en kombination av relativt snabba förändringar av de vertikala lasterna (associerade med deglaciation) och horisontell kompression från mittatlantiska ryggen relaterad till kontinentaldriften. Jordskred och kraftigt störda jordlager (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.

Vissa forskare hävdar att postglaciala strukturelement ej enbart förekommer i norra Sverige utan är vanliga i hela landet /5.5-45/. Bergrörelser skulle då ha ägt rum direkt i samband med den senaste glaciationens avsmältningförlopp. Man hävdar att indikationer på detta står att finna i omlagringar av blockansamlingar vid urbergsytan. Emellertid är man osäker på djupgåendet av strukturerna.

De tidigare nämnda projekten som skall kartlägga eventuella förskjutningar av gamla strandlinjer liksom olika dateringsprojekt och användning av GPS-teknik kommer att ytterligare belysa neotektoniska och postglaciala företeelser.

Seismicitet kan sägas vara ett tecken på aktiv tektonik i ett geologiskt tidsperspektiv. Mer än 95% av alla jordskalv sker vid kontinentalplattornas gränser. Årligen inträffar ca en miljon jordskalv på jordklotet med en magnitud över 2 på Richterskalan. Därav sker ca tio skalv i Sverige. Med andra ord är vårt land ett seismiskt lugnt område. De största jordskalven i Sverige når som högst en magnitud av ca 5.

De svenska jordskalven är i huvudsak samlade till två områden. Det ena sträcker sig från Väneren ner till västkusten. Det andra området följer kusten längs Botten-



Figur 5.5-5. Östersjöns olika utvecklingsstadier efter den senaste nedisningen samt en bild över den tidigare högsta kustlinjen. Ofärgade partier innanför nuvarande kustkontur är vattentäckta. Bilderna är framtagna med SKBs Geografiska informationssystem.

havet, Bottenviken mot Tornedalen och norra Lappland. Merparten av de svenska skalven sker djupt ner i berggrunden, d v s jordskalvets fokus ligger 10-20 km under markytan och rörelserna är där små. Beräkningar visar på förskjutningsbelopp av ca 10 mm vid magnituder om 5 /5.5-46/. Rörelsen sker som en reaktivering i en befintlig förkastningsstruktur och inom en radie av ca 900 m nere vid jordskalvets fokus.

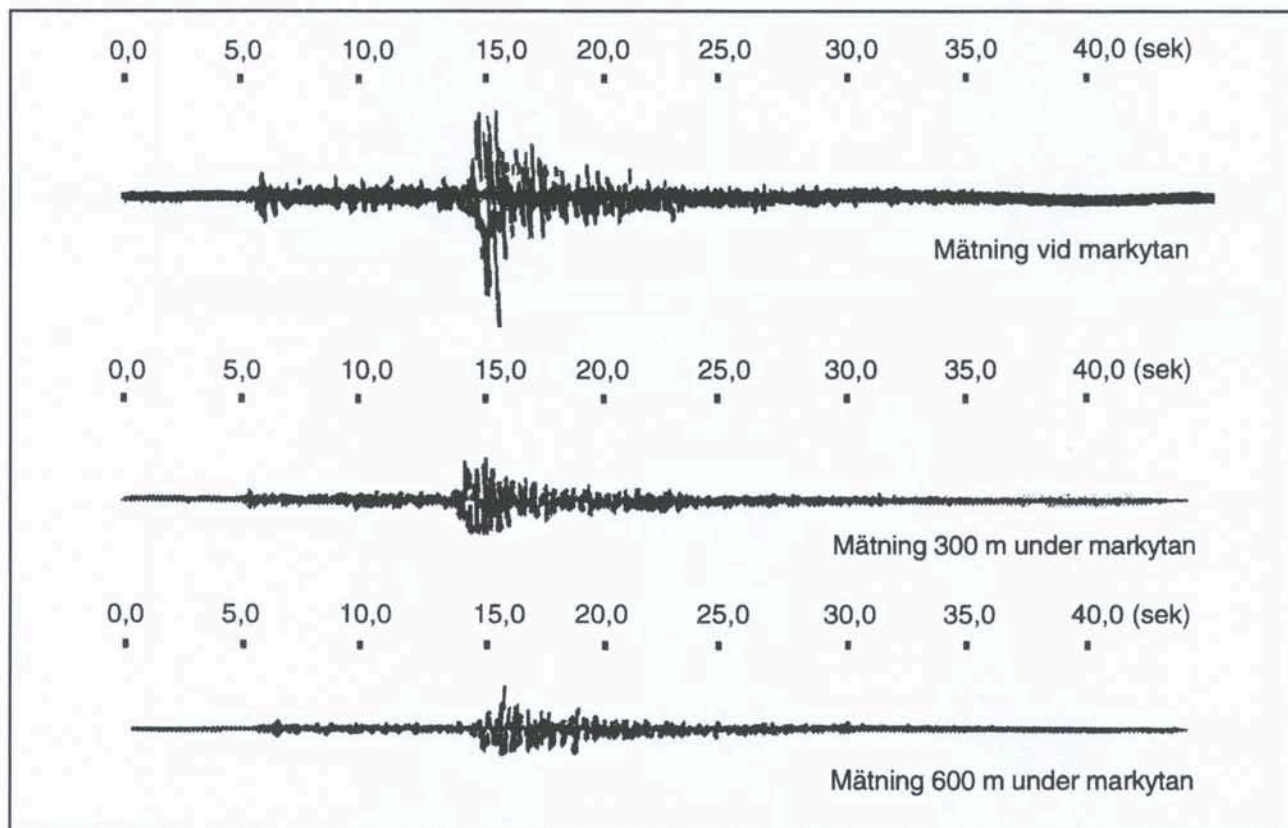
Mekanismerna som styr skalven inom kontinentalplattorna, t ex inom den Baltiska skölden, är relativt dåligt kända /5.5-47/. I Sverige gäller diskussionen om jordskalven styrs av de platttektoniska processerna, den pågående landhöjningen eller är en kombination av båda mekanismerna /5.5-47/. Genomförda seismiska mätningar /5.5-48, 49, 50/ 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 platttektonik och största horisontella huvudspänningar, d v s kompressioner. I den Baltiska skölden uppträder vissa avvikelser i spänningsfältet, speciellt nära markytan, vilket kan förklaras som effekter av glaciations-landhöjningsprocesserna. I en separat seismo-tek-

tonisk sammanställning genomförd på uppdrag av SKB betonas speciellt landhöjningens påverkan /5.5-51/.

Vad beträffar effekter av jordskalv på underjordsanläggningar gäller generellt att de mekaniska påkänningarna på sådana anläggningar blir mindre än för anläggningar som finns på markytan. Det finns en mängd observationer, framförallt från gruvor, som stöder dessa iakttagelser /5.5-52, 53/. SKB har nyligen engagerat sig i ett japanskt projekt i forskningsgruvan Kamaishi bl a för att studera de seismiska och anläggningstekniska effekterna vid jordskalv. Kamaishi ligger i ett seismiskt aktivt område med frekventa skalv med magnituder av 5-7. Figur 5.5-6 visar resultat från seismografer i Kamaishi på olika nivåer under markytan. Den fria energin (accelerationens amplitud) är störst vid markytan och avtar mot djupet.

Förutom de mekaniska effekterna av seismicitet studeras också de grundvattenhydrauliska och vattenkemiska effekterna dels vid Kamaishigruvan /5.5-81/, dels i andra internationella projekt /5.5-54, 55/.

Sammanfattningsvis ligger Sverige i ett seismiskt lugnt område. Idag finns inga tecken på att detta skulle ändras i ett 100 000-års perspektiv förutom de förändringar i spänningsförhållanden som kan orsakas av en framtida istid.



Figur 5.5-6. Ett exempel på vibrationernas avtagande med djupet. Jordskalvet ägde rum den 27 januari 1991 med magnituden 4,6, nära Kamaishi forskningsgruva i Japan. Seismogrammen visar registreringar för skalvet på olika djup.

Inducerade laster är sådana laster som uppkommer till följd av den störning som djupförvaret i sig eller dess anläggande utgör. Inducerade laster går inte att undvika utan inträffar med nödvändighet som en följd av att djupförvaret byggs. Frågorna är var, när och hur rörelser och laster uppträder. De inducerade lasterna, och därmed förknippade rörelser, är företrädesvis lokala och knutna till djupförvarets omedelbara närhet.

Skapandet av hålrum i bergmassan ger spänningsomlagring och spänningskoncentrationer. Den kortsiktiga spänningsbilden runt förvaret beror förutom på bergmassans egenskaper (initialspänningar, uppsprickning och hållfasthet) på uttagsmetod (försiktig eller konventionell borrar och sprängning) samt på geometrisk utformning ("rektangulär" eller "cirkulär" tunneltvärnsnitt). Bergschaktarbeten (borrar, sprängning) ger viss uppsprickning av berget nära tunnarna. Ett höghållfast och sprickfattigt berg främjar risken för s k smällberg.

Värmeutvecklingen i det lagrade avfallet kommer att ge en förhöjd temperatur i djupförvarets närhet upp till lokalt ca 80°C, som sedan långsamt avklingar. Lokalt kring deponeringstunnarna ger den termiska lasten ökade tangentiella spänningar. Vid avsvälningen kan partier med låga spänningar uppstå med risk för lokal instabilitet (blockutfall). Lokala temperaturskillnader under uppvärmningsfasen (gradientproblem) kan medföra ökad sprickbildning. Avgörande för betydelsen av termoinducerade spänningarna är bland annat tidsperspektivet.

På lång sikt kommer berget genom krypning sträva efter att utjämna spänningskoncentrationer. En fortlöpande mycket långsam uppsprickning av berget nära tunnarna kan förväntas.

De inducerade lasterna är erfarenhetsmässigt kända från liknande undermarks konstruktioner, exempelvis gruvor och vattenkraftsanläggningar. Det finns goda möjligheter att beräkna medeluppträdandet för anläggningen med hjälp av väl dokumenterade modeller. Största svårigheten ligger i att kvantifiera olika typer av långtidseffekter. De lokala variationer som förekommer kan hanteras förutsatt fungerande kvalitetskontroll under byggfasen /5.5-57/.

För en ytterligare kommentarer och beskrivning av kunskapsläget när det gäller djupförvarets utförande och byggmetoder hänvisas till kapitel 8.

Verksamheten i förhållande till mål i FUD-program 92

I FUD-program 92 uppställdes ett antal mål för FoU-arbetet om berggrundens stabilitet inför perioden 1993-1998. Här följer en kort lägesredovisning i relation till målen:

- Genomföra en seismotektonisk sammanställning över Baltiska skölden. – En separat rapport har tagits fram och presenterats vid ett expertseminarium /5.5-51/.
- Genomföra en pedagogisk sammanställning som visar den sprödktekoniska historiken i Baltiska urbergsskölden med de lastsituationer som ägt rum. – En separat rapport är sammanställd och även den har presenterats vid ett expertseminarium /5.5-25/.

- Detaljstudera och kartlägga landhöjningen i olika regioner av Sverige. – Sammanställningsarbete pågår efter avslutade fältinsatser. Avsikten är att initiera verksamhet utifrån GPS-mätningars resultat.
- Genomföra detaljstudier av tidigare strandlinjer i några regioner av Sverige för att klarlägga eventuell postglacial tektonik. – Sammanställningsarbete pågår efter avslutade fältinsatser.
- Öka kunskapen om den kristallina berggrundens sprödktekoniska fragmentering. – Vissa arbeten har genomförts inom ramen för Äspöprojektet /5.5-19, 59/. Litteraturstudier pågår och översiktliga datasimuleringar har genomförts.
- Vidareutveckla dateringsmetoder av sprickzonsrörelser. – En separat resultatredovisning har sammanställts /5.5-30/. Arbetet har redovisats vid flera internationella konferenser. Vetenskapliga uppsatser är publicerade /5.5-58/. Ytterligare insatser planeras i Laxemar, borrhål KLX 02 och i Äspölaboratoriet.
- Öka förståelsen av bergspänningsmätningars representativitet. – En databas över tillförlitliga spänningsmätningar har sammanställts inom ramen för lokaliseringens översiktsstudier. Programarbete pågår för att initiera en separat studie.

5.5.5 Grundvattenkemi

I detta avsnitt behandlas betydelsen av grundvattenkemin samt kopplingen till bergets mineralogiska sammansättning och till de hydrologiska förhållandena.

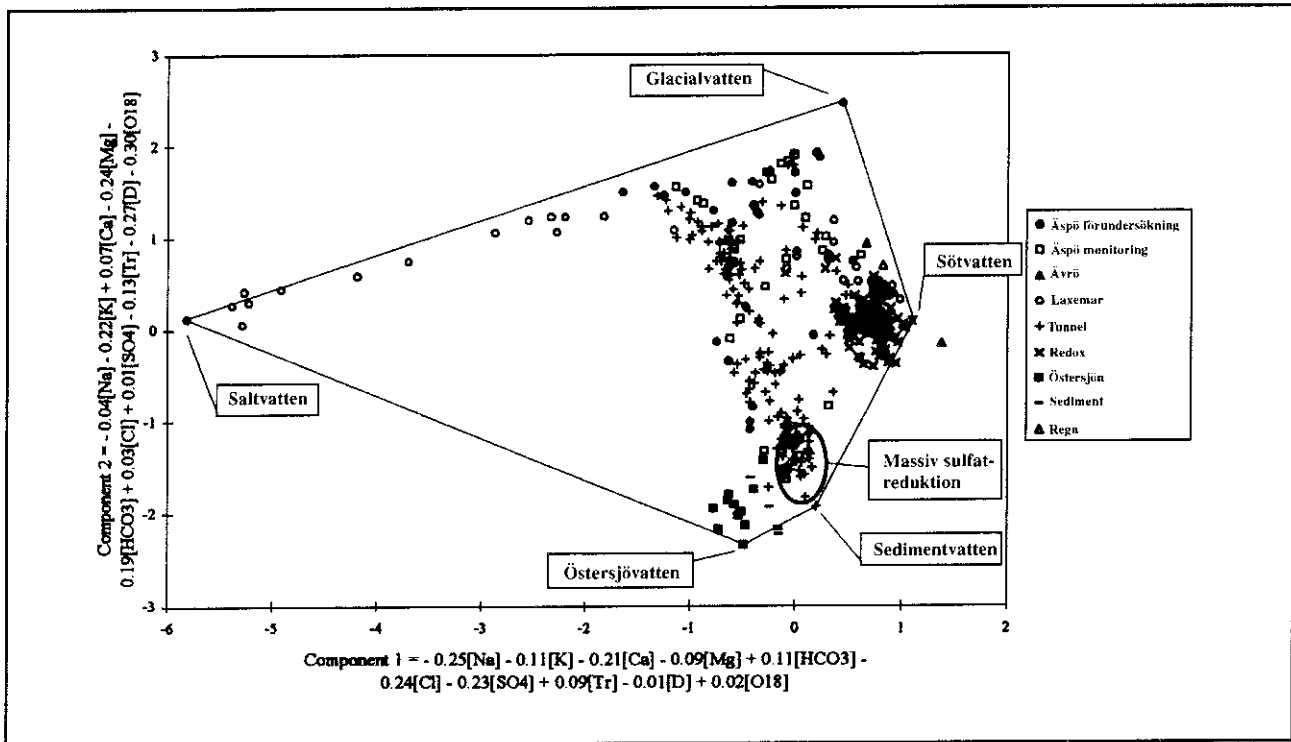
Målet för insatserna inom SKBs hydro- och geokemiska verksamhet är att kunna säkerställa en gynnsam kemisk miljö i förvaret genom att

- klarlägga grundvattenkemiska förhållanden av betydelse för förvarets långsiktiga funktion,
- klarlägga de processer som kan påverka de grundvattenkemiska förhållandena över långa tider,
- belägga de geohydrologiska grundvattenflödesmodellerna via vattenkemiska observationer i berggrunden.

I FUD-program 92 ges en beskrivning av kunskapsläget på området. För en fyllig redovisning hänvisas till denna redogörelse samt SKBs Annual Reports. Därutöver har ny kunskap erhållits inom följande områden:

Grundvattentyper med olika ursprung

Både söta och salta vatten i bergets spricksystem utgör blandningar av flera vattentyper med olika ursprung, och kan delas upp i flera olika ursprungsvatten /5.5-145/. Multivariatanalys har använts för att identifiera och gruppera vattenproven i olika typklasser s k ursprungsvatten. Grundvatten från Äspö och det djupa borrhålet KLX 02 på



Figur 5.5-7. Resultat av principal komponent analys av Äspö data. De olika valda "ursprungsvatten" är indikerade. Område med massiv sulfatreduktion är markerat. Vikten för de olika elementen visas i ekvationerna för axlarna.

Laxemar, se avsnitt 5.5.7, kan beskrivas som en blandning av modernt infiltrerat sötvatten, porvatten i bottensedimenten, glacialt smältvatten, modernt Östersjövatten och gammalt mycket salt vatten, se Figur 5.5-7. Av figuren framgår att vattenprover tagna i olika sammanhang ligger väl samlade. Tex är de vatten som provtagits under förundersökningsfasen en blandning mellan "saltvatten" och "glacialvatten". Det som provtagits i tunneln har större inslag av "Östersjövatten".

Genom att utnyttja de olika vattentypernas speciella karaktär (d v s halt av vissa ämnen och isotopkvoter) kan man med multivariat teknik bestämma proportionerna av ingående ursprungsvatten i ett vattenprov med en uppskattad osäkerhet av ca ± 10% /5.5-146/. Denna multivariatbaserade utvärderingsteknik kommer att vidareutvecklas inför kommande platsundersökningar. Målet är att i ett tidigt skede av en platskaraktärisering kunna identifiera gynnsamma och ogynnsamma grundvattenkemiska förhållanden med avseende på de olika barriärernas funktion.

Grundvattnets omsättningstid

I FUD-program 92 beskrivs hur vattnets kemiska sammansättning i kombination med olika stabila och radiogena isotoper kan användas för att bestämma grundvattnets omsättningstid. De olika vattentypernas ursprung kan också användas för att bedöma vattnets omsättningstid. Dessutom har kombinationen av strontium-87, kol-13 och syre-

18 förhållandena i grundvatten och sprickmineral varit mycket användbara.

En samlad tolkning av de data som beskriver vattnets omsättning på Äspö ger följande bild: Ner till ca 500 m djup har grundvattnet på Äspö påverkats av förhållandena efter senaste istid. Man kan i vattensammansättningen spåra de tidigare stadierna i Östersjöns utveckling.

På ytterligare djupare nivåer är vattnet obetydligt påverkat av postglaciala händelser och därför att betrakta som stagnant i ett 10 000 års perspektiv /5.5-147/.

Det mycket salta vattnet som påträffats på ca 1000 m djup i KLX 02 kan anses vara mycket gammalt och stagnant /5.5-145/. För att ytterligare klarlägga detta förhållande kommer fler dateringsmetoder att appliceras, bl a Cl-36 analys och ädelgasanalyser. Resultaten från både Äspö och Laxemar visar att förmodligen har de kemiska förhållandena på stort djup, 1000 m, varit stabila i ett tidsperspektiv av 100 000 år eller längre.

För att i detalj kunna utvärdera vattenomsättningen i Äspös omgivning har Östersjöns utveckling kartlagts /5.5-148/. Förändringar som kan användas för att spåra tidigare rådande grundvattenförhållanden gäller i första hand för syre-18, deuterium och koldioxidtryck. Värdet på dessa parametrar och andra har listats för de förhållanden som rådde före, under och efter glaciationen.

Detta utredningsarbete är en viktig länk till de paleogeohydrologiska utredningar och modelleringar som beräknas pågå i många år. Arbetet syftar till att ge en global bild av de variationer i grundvattenflöde och samman-

sättning som kan tänkas förekomma i samband med glaciationer, se avsnitt 5.5.8.

Redoxförhållanden

För att kopparkapseln inte skall korrodera krävs syrefria förhållanden. För att komma från en syrerik (oxiderande) till en syrefri (reducerande) miljö i berget krävs reaktioner och processer som förbrukar syret (redoxbuffert). Detta sker vanligtvis i det ytligaste berget på något 10-tal meters djup. Redoxbuffert-kapaciteten liksom även nivån (Eh-värdet) har antagits domineras av reducerande (järninnehållande) mineral i berggrunden. (Se FUD-program 92 för en närmare beskrivning.)

Emellertid har *bakteriell syrereduktion* visat sig mest betydelsefull då det gäller att reducera löst syre i infiltrerat ytvatten /5.5-149/. Vattnets innehåll av organiskt material har omvandlats till vätekarbonat och syret reducerats via bakteriell medverkan. Om mängden organiskt material överstiger ca 10 mg/l i det infiltrerande vattnet, kommer allt löst syre att förbrukas nära markytan. Vid ett stort överskott av organiskt material fortgår koloxidationen via bakteriell reduktion av järn(III) mineral och sulfat även under syrefria förhållanden.

Även under forcerad vattenomsättning, som kan förorsakas av inflöde till olika försvarsdelar, kommer löst syre att reduceras nära markytan och således inte påverka de reducerande förhållanden som råder i berggrunden före försvarsutbyggnaden.

Förekomsten av *bakteriell sulfatreduktion* har kunnat spåras i tunnelavsnittet mellan Hålö och Äspö. En samtolkning av hydrologiska, kemiska och biologiska data visar att det sannolikt är inslaget av ca 40% eller mer av sedimentvatten, se Figur 5.5-7, som gör att denna process pågått i stor omfattning /5.5-150/. Kloridhalter i intervallet 4000 - 6000 mg/l och TOC halter på >10 mg/l korrelerar positivt med höga vätekarbonathalter, låga sulfathalter och förekomst av sulfatreducerande bakterier. Produkten från denna process är sulfid som på detta sätt kan genereras i stora mängder, ca 100 mg/l, lokalt. Havs-sediment med högt organiskt innehåll kan därför utgöra ett villkor för att sulfatreduktion skall förekomma, jfr 5.4.6 och 5.6.2.

Vatten-mineral reaktionerna

Grundvattnets sammansättning bestäms i huvudsak av fem olika processer:

- Jämvikt med mineral på sprickor och i bergmatrisen.
- Yreaktioner; jonbyte och sorption.
- Upplösning och utfällning av mineral.
- Bakteriell aktivitet t ex av sulfat och järnreducerande bakterier.
- Blandning av vatten med olika ursprung.

För att kunna utröna effekterna av vatten-mineral reaktioner måste först blandningen av olika typer av vatten klarläggas. Med multivariatteknik kan man, som tidigare

beskrevs, kvantitativt härleda andelen av olika ursprungsvatten i vattenprov. I första hand baseras blandningsberäkningarna på innehållet av s k konservativa konstituent, främst klorid och stabila isotoper. Icke konservativa konstituent uppvisar då en avvikelse i halt jämfört med blandningsberäkningen. Avvikelsen är resultat av vatten-mineral reaktioner.

Växelverkan mellan vatten och mineral har under kortare eller längre tid utvecklat den sammansättning som respektive ursprungsvatten har. I de djupa salta vattnet från KLX 02 avviker syre- och väte-isotopdata från det lineära sambandet Meteoric Water Line, som gäller samtliga meteoriska vatten. Detta är en stark indikation på en omfattande vatten-mineral växelverkan som pågått under mycket lång tid, måhända ända upp till miljontals år. Den extremt höga salthalten kan också härröra från en mycket lång uppehållstid.

Vid rådande grundvattentemperaturer är *nybildningen av stabila sekundära mineral* mycket långsam och jämvikt uppnås endast mellan vatten och reaktiva mineral som t ex kalcit. Traditionell geokemisk jämviktsmodellering kan därför inte förväntas ge korrekt prediktion av grundvattnets kemi /5.5-154/, eftersom vattnets kemiska sammansättning ej står i jämvikt med de olika mineralfaserna. Detta styrks av det pilotförsök som gjorts på Äspö att provta vatten ur lågkonduktiva partier och att analysera huvud- och spårelement /5.5-151/. I Tabell 5.5-1 finns en jämförelse mellan prov tagna i låg- och högkonduktiva borrhål i olika bergarter. /5.5-152/.

Tabell 5.5-1. Kemisk sammansättning hos grundvattnet i Äspödiorit och grönsten. Halterna är angivna i mg/l, * i µg/l.

Ämne	ÄSPÖ DIORIT		GRÖNSTEN
	Högekond	Lågekond	Lågekond
flöde ml/min	600	30	2.5
Na	2030	1990	2080
Ca	1700	1680	1720
Mg	77	72	68
HCO ₃	40	34	24
Cl	6400	6200	6600
Br	34	38	45
SO ₄	435	444	450
Sr	26	27	30
Fe	0.44	0.32	0.05
Mo*	50	71	79
U*	0.6	0.07	0.53
La*	0.7	0.56	0.76

Det faktum att stora skillnader i sammansättning hos prov i låg- respektive högkonduktiva partier och i diorit respektive grönsten saknas, indikerar att mineralvatten reaktionerna i mikroskala har en underordnade betydelse

i jämförelse med blandning och andra processer som äger rum i makroskala.

Jonbytesjämvikter med lermineral i sprickor och sprickzoner har en påtaglig inverkan på vattenkemin, framför allt på halterna av och proportionerna mellan Na, Ca, Sr, Rb och Cs /5.5-147, 153, 154, 155/. Kinetiken för jonbytesreaktionerna är sådan att dessa kan studeras både i lab och i fält och påverkas av förändringar i grundvattenförhållanden under tunnelkonstruktionen.

Upplösningen av lättvittrade mineral som kalcit, Calcipioklas och biotit kan också förväntas bidra till förändringar i vattnets sammansättning i ett kortare tidsperspektiv. Dessa reaktioner sker företrädesvis nära markytan där vattnets pH-värde är lågt och vittringen sker med en hastighet som kan studeras i lab /5.5-156/.

Bakteriella processer kan som tidigare nämnts påverka vattnets sammansättning. Till detta krävs emellertid en god tillgång på organiskt material eller annat substrat. Bakteriella processer som påverkat vattenkemin på Äspö är:

- Reduktion av löst syre som medfört en förhöjning av vätekarbonathalten och minskning av halten organiskt material /5.5-155/.
- Reduktion av järn(III)mineral och medföljande ökning av karbonat och järnhalt /5.5-155/.
- Reduktion av sulfat och ökning av karbonat och sulfidhalter /5.5-150/.

Dessa snabba processer kan medföra nybildning av mineral som kalcit, magnetit och pyrit. Kalcit och magnetit har observerats i färskrostutfallningar /5.5-153/.

I sprickmineralsammansättningen finns spår av tidigare hydrokemiska förhållanden. Detta kan utnyttjas på två olika sätt: dels för att spåra tidigare grundvattenflödesmönster, dels för att utvärdera transporten av radionuklidliknande ämnen. Insatser som syftar till att klarlägga tidigare flödessituationer pågår inom det paleohydrogeologiska programmet, se avsnitt 5.5.8.

Fördelningen av Uran, thorium och sällsynta jordartsmetaller (radionuklidanaloger) i sprickmineral och vatten beskrivs i FUD-program 92, Detaljerat FOU-program 1993 -1998. Därefter har bindningen av de tre vanligaste mineralerna studerats genom sekventiell lakning av lermineral, järnhydroxider och kalcit /5.5-153/. Dessa tre mineraltyper utgör den största kontaktytan med vatten i sprickor och sprickzoner på Äspö.

Jonbyte med lermineral är den viktigaste retentionsfaktorn för Cs och Rb. Sannolikt också för Sr (som även inkorporeras i kalcit). Th och sällsynta jordartsmetaller anrikas i lermineral men även i järnoxider och kalcit. Ba och Ra återfinns i järnoxid och kalcitutfällningar.

Inkorporeringen i kalcitmineral kan i ett långt tidsperspektiv anses vara en fullständigt reversibel process eftersom kalcitutfällning och upplösning är snabba reak-

tioner som påverkas bl a av koldioxidtryck, pH- och temperaturförhållandena i berget.

Cs upptag på lermineral består av en snabb och en långsam sorption, tidigare kallad reversibel resp icke reversibel. I ett långt tidsperspektiv är det emellertid troligt att även den långsamma sorptionen är reversibel, t ex är Cs-halterna i vatten med mycket hög salthalt i borrhålet KLX 02 korrelerade med Na-halterna, vilka styrs via reversibelt jonbyte /5.5-154/. Även Rb och Ba sorberas reversibelt på lermineraller.

Fortsatt arbete inriktas på att bättre klargöra reversibel/icke reversibel sorption och dess betydelse i förvarets tidsperspektiv.

Verksamheten i förhållande till mål i FUD-program 92

En systematisk bearbetning och sortering av samtliga kemidata i SKBs databas – GEOTAB – i kvalitetsklasser och typklasser har genomförts /5.5-157/. Vatten som är representativa för den miljö där de provtagits anses ha hög kvalitet. Kvalitetsklassningen har utförts i samarbete med TVO och därigenom kunnat utnyttja en större databas. Typklassningen är en tolkning av befintliga data som systematisk tillämpats för utvärderingen av både Äspö och Laxemarförhållandena /5.5-145, 146/.

Multivariatanalys används vid typklassindelningen. Detta ökar tillförlitligheten hos tolkningarna genom att alla utvärderingar genomförs på samma sätt. Kvalitetsklassningen kan emellertid inte genomföras på samma strikta sätt. Ett visst mått av expertbedömning är nödvändig /5.5-157/.

Fördelningen av spårelement (radionuklidanaloger) i sprickmineral har genomförts med de vanligast förekommande mineralerna /5.5-153/. En traditionell K_d-bestämning med samma mineralprov planeras.

Olika isotopmetoder har prövats vid analys av sprickmineral, borrhämnor och vatten för bestämning av grundvattnets omsättningstid och historia /5.5-147, 153, 154, 155/. Användbarheten är starkt beroende av komplexiteten och variationerna i det undersökta materialet. Ett exempel på detta är de kol-14 bestämningar som gjorts i redoxzonen i Äspö-laboratoriet. Kol-14 aktiviteten är högst i vatten från det djupaste borrhålet och lägst i det ytligaste. Räknat i ålder ger analyserna 3365 år för 15m djup och 250 år för 70 m djup. Även om C-14 analyserna i detta fall är missvisande som dateringsteknik har de varit användbara för att kvantitativt belägga effekterna av bakteriell syrereduktion.

Förekomsten av mycket salt och förmodligen stagnant vatten på stort djup både i Äspö och på Laxemar är betydelsefull för paleohydrogeologiska och regionala grundvattenförhållanden. De hydrokemiska förhållandena är föremål för omfattande analyser i detta hänseende /5.5-145, 146, 147, 154/. Arbetet kommer att fortsätta inom ramen för det paleohydrogeologiska programmet /5.5-158/.

Försurningens effekter på berget /5.5-159/ och på vattnet /5.5-110/ har utretts. Sammanfattningsvis kan man

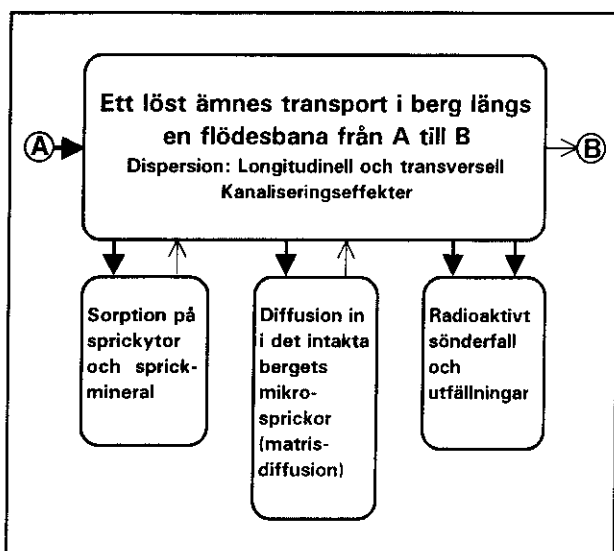
konstatera att försurning förorsakad av förbränningen av fossila bränslen inte får någon påtaglig effekt på ett djupförvar.

Vatten i lågkonduktiva partier i berget har mot förmodan visat sig ha en likartad sammansättning som vattnet i mer konduktiva partier av berget. Även variationer i bergart har mycket liten betydelse för den kemiska sammansättningen /5.5-151, 152/.

Storleken av den våta ytan i flödesvägarna från markytan ner till redoxzonen förväntades ha betydelse för syrereduktionens hastighet. Emellertid visade redoxexperimentet att det är bakteriell aktivitet som förbrukar det lösta syret. Eftersom reduktionshastigheten då är beroende av tillgången på organiskt oxiderbart material är den våta ytan ovidkommande i sammanhanget /5.5-149/.

5.5.6 Bergets förmåga att begränsa nuklidtransport

Bergets förmåga att begränsa transport av olika ämnen är en sammansatt egenskap. Den har bl a att göra med grundvattenflöden och flödesvägar. Dessa bestäms i sin tur av bergets vattengenomsläpplighet, graden av inhomogenitet, det aktuella områdets topografi, vattenbalans, etc. Om vattentransporten sker utan påverkan av kvarhållande mekanismer betraktas den som icke-reaktiv. Den icke-reaktiva transportprocessen innehåller advektion (konvektion), kinematisk dispersion och molekylär diffusion. Den sammanlagda retarderande effekten på nuklidtransport styrs av diffusionen in i intakt berg och av berggrundens sorptionsegenskaper. Dessa bestäms av grundvattenkemin, bergets mineralogiska sammansättning, bergets mikrosprickor, sprickmönstrets karaktär och tillgången till sorptionsytor, se Figur 5.5-8.



Figur 5.5-8. Schematisk illustration som visar de retarderande processerna på nuklidtransport i berggrunden. (efter /5.5-82/).

Det övergripande syftet med det FoU-arbete som ägnas bergets förmåga att begränsa grundvattenflöde och föroreningstransport är att:

- möta de hydrogeologiska funktionskraven så att djupförvaret kan anläggas och fungera stabilt under deponeringsfasen,
- kunna beskriva och kvantifiera hur grundvattenflödena är fördelade i berggrunden,
- kvantifiera processer av betydelse för transport av lösta ämnen,
- beskriva bergets retarderande egenskaper,
- kunna identifiera berggrund med goda retarderande egenskaper.

I det nedanstående ges en kortfattad resumé över allmänt kunskapsläge med referenser till studier som genomförts vid SKB åren 1993-1995. I övrigt hänvisas till SKBs Annual Reports och redovisningar i TR-serien.

Grundvattenflöde och advektion

Många studier har visat att Darcys lag är tillämplig inom ett brett intervall av hydrauliska gradienter. Darcys proportionalitetskonstant, som vanligen kallas för hydraulisk konduktivitet, är relaterad till vätskans densitet, viskositet och en formfaktor som beror av vätskepassagens geometri. Den vanligaste ansatsen för att beräkna och beskriva flöde i sprickigt berg, vilket kan förutsättas vara laminärt, utgår från Darcys lag.

Under det senaste decenniet har teoretiska och experimentella studier bidragit till en successivt ökad förståelse av flödesprocessen i sprickig berggrund. Användning av geostatistiska metoder för bearbetning av hydrauliska egenskaper och fraktal karakterisering av spricklängder, sprickvidder etc, liksom kunskapen om tvåfasflöde och flerporositetssystem har ökat. Geofysiska metoder har utvecklats till att bli värdefulla komplement till hydrauliska tester och därmed skapas bättre underlag i modellarbetet. Större intresse ägnas kopplade processer till grundvattenflödet, d v s termo-hydro-mekaniska samband och vattenkemiska beroenden.

Hydrauliska gradienter som styr grundvattenflödena i berggrunden har erfarenhetsmässigt relativt liten variation. Vanliga värden är 0,1 - 1% och vid stora topografiska skillnader kan gradienten öka något.

Vid grundvattenmodellering är trovärdiga randvillkor väsentliga. De tredimensionella modellerna blir allt vanligare, vilket innebär att successivt mer komplicerade flödesgeometrier analyseras. Det största intresset vid grundvattenmodellering för ett förvar ägnas nivåer ca 500 m under markytan. Med hänsyn till klassisk teori för grundvattenströmning kan man förvänta sig att flödet vid ett djupförvar influeras av regionala grundvattensystem. Den lokala topografin vid ett förvarsområde med små höjdskillnader har sannolikt mycket litet att göra med flödesförhållandena på själva förvarsnivån. Flödet vid djupförvaret styrs då av regionala gradienter.

Med utgångspunkt i den svenska höjddatabasen analyseras för närvarande våglängder och amplituder för den svenska topografin (ett signalanalytiskt angreppssätt). Målet med studien är att öka förståelsen av den hydrauliska gradientens djupberoende och vilken inverkan som topografin kan ha /5.5-65/.

En av drivkrafterna för grundvattenflödet är skillnader i vätskans densitet. Grundvattnet i berggrunden uppvisar en salthaltsvariation som påverkar densiteten och de rådande tryckförhållandena i detalj. Om det vore möjligt att med större noggrannhet mäta vertikala tryckvariationer vid modellränder till 1 km djup skulle troligen mer realistiska regionala flödesbeskrivningar erhållas än flöden beräknade utifrån randvillkor baserade på topografiska data.

En annan aspekt som berör salthalts- och densitetssituationen för grundvattnet är eventuella konvektionsflöden som kan uppstå vid uppvärmning från deponerade kapslar. Resultat visar att en salthaltsgradient mot djupet har en mothållande och balanserande funktion för tänkbara konvektionsflöden. /5.5-66/.

Hydraulisk konduktivitet, eller berggrundens vattengenomsläpplighet, är en central parameter för att kunna beskriva grundvattnets flöde. Den relateras som ovan nämnts både till flödesmediets och vätskans egenskaper. (Om konduktiviteten integreras över det vattenförande lagrets mäktighet benämns parametern transmissivitet).

Utveckling av in situ-metoder för bestämning av genomsläpplighet och magasineringsegenskaper i sprickigt berg sker fortlöpande. Betydande insatser görs framför allt inom verksamheten för gas- och oljeprospektering. Analysmetodikerna har förbättrats genom Stripa- och Äspöprojekten, främst när det gäller mellanhålstester (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 arbete sker även fortsättningsvis i samband med Äspöprojektet och vid de tester som påbörjats i djuphålet Laxemar KLX 02. En separat kunskapssammanställning med utvecklingsförslag är nyligen framtagen av en expertgrupp på initiativ av SKB /5.5-69/.

I FUD-program 92 framhölls att erfarenheterna från flera tunnelundersökningar visat att de hydrauliska konduktiviteterna tycks minska närmast tunnelväggarna. Man har sökt förklaringar till detta fenomen i spänningsomlagringar och kemiska utfällningar. En ytterligare förklaring är att konduktiviteitsminskningen kan vara en fasgränsmekanism mellan luft eller annan gas och vatten. Processen regleras då av ett tvåfasflöde. Preliminära teoretiska beräkningar stöder den senare teorin /5.5-70/ och SKB har tillsammans med US DOE (U.S. Department of Energy) initierat experimentell verksamhet med inriktningen tvåfasflöde vid Äspölaboratoriet /5.5-71/. En övergripande förståelse av tvåfasflöde är också viktig för tolkning och conceptualisering av grundvattenflöden baserade på tunnelkartering.

Kunskapen om tvåfasflöde i sprickigt berg är även väsentlig för att förstå bentonitbuffertens vattenhomoge-

nisering under deponeringsskedet och när det gäller förutsättningarna för gasmigration.

Flödesporositeten (kinematisk) är en central parameter när advektionsprocessen eller grundvattnets medelhastighet skall bestämmas. I den internationella litteraturen förekommer relativt få riktvärden för kristallina bergarter. Generellt sett är flödesporositeten låg och av storleksordningen 10^{-5} till 10^{-2} /5.5-72, 77, 78/.

Värden på kinematisk porositet kan erhållas indirekt från hydrauliska tester eller via spårämnesförsök. Vid hydrauliska tester tolkas genomsläppligheten och sprickvidder generaliseras med hjälp av ett samband som säger att den hydrauliska konduktiviteten är proportionell mot sprickans vidd i kubik ("cubic law relation"). Vid spårämnesförsök tolkas den tillgängliga flödesporositeten utifrån en medelhastighet och med hänsyn till en kinematisk dispersivitet.

Inom ramen för Äspöprojektet har vissa in-situ studier påbörjats som skall ge ett bättre underlag om tillgänglig porositet och dess variation vid transportmodellering av grundvatten /5.5-73/. På uppdrag av SKB har även en metod för sprickporositetsbestämning utvecklats där fluorescerande epoxy injiceras i borrhäror och kartläggs/analyseras med hjälp av ett bildbearbetningssystem, se även nedan och Figur 5.5-8.

Kinematisk dispersion är ett "blandningsfenomen" som beror av hastighetsskillnader för flödet i en spricka och av hastighetsskillnader mellan olika sprickor. Flödet blandas genom sprickor som korsar varandra och successivt erhålls förändringar av lösta ämnens 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 /5.5-76, 79/.

Molekylär diffusion innebär att i vattnet lösta ämnen förflyttas från områden med höga koncentrationer till områden med låga koncentrationer (Ficks lag). Den molekylära diffusionen anses generellt vara underordnad effekten av kinematisk dispersion vid icke-reaktiv transport och behandlas ej för berggrundens sprickor och zoner /5.5-79/. Däremot är processen väsentlig för indiffusionen till bergets mikrosprickor, s k matrisdiffusion.

Magasinskoefficienten i berggrunden är av betydelse då den transienta flödessituationen av grundvattnet skall beskrivas. Den specifika magasinskoefficienten definieras som avgiven vattenvolym per enhetsänkning av det hydrauliska trycket och den beror på porositeten samt vattnets och bergets kompressibilitet. Vid teoretiska studier har man konstaterat att magasinskoefficienten är proportionell mot tredje roten ur transmissiviteten. För mer kanaliserade flöden är motsvarande relation ett enkelt rotuttryck. Fältnätningar av den hydrauliska diffusiviteten stöder dessa teorier /5.5-74, 75, 76/.

Databaser över magasinskoefficienter för kristallint urberg är relativt begränsade. I och med att transienta mellanhålstester blir vanligare i sprickig berggrund förväntas erfarenheterna bli bättre vad gäller variabilitet

och eventuella skaleffekter. Vanliga värden på magasin-koefficienten för svenskt urberg ligger i intervallet $5 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-6}$.

Retardation

I avsnittet 5.5.5 beskrivs mer utförligt kunskapsläget om berggrundens hydrokemiska miljö. Kunskapsläget om radionukliderna och den geokemiska miljön för förvarets olika barriärer i sin helhet redovisas i avsnitt 5.6. I detta avsnitt kommenteras kortfattat enbart de retarderande egenskaperna för radionuklidernas spridningsvägar med avseende på sorptionsmekanismer och indiffusion till bergets mikrosprickor, s k matrisdiffusion. Vidare kommenteras kortfattat förutsättningar för transport med naturligt lösta gaser i grundvattnet.

Sorption är starkt beroende av jonernas laddning, hydrolys och eventuella komplex med starka komplexbildare. Därför är det väsentligt att känna till grundvattnets pH, redoxförhållanden och innehåll av komplexbildare t ex humus- och fulvosyror. Jonbyte är en viktig sorptionsmekanism för t ex Cs^+ och Sr^{2+} . Därför är även vattnets salthalt av betydelse, se avsnitt 5.5.5.

De mineral som utgör själva substratet för sorptionen har olika kapacitet att ta upp radionuklider. Vissa mineral är t ex goda jonbytare medan andra inte är det o s v. De K_d -värden som används i säkerhetsanalysen väljs så att inte fördröjningen i radionuklidtransporten överskattas. Komplexbildning med humus- och fulvosyror kan sänka sorptionen för en del av radionukliderna. De valda K_d -värdena kan justeras med hänsyn till detta /5.5-89/.

Sorberande radionuklider skulle i princip kunna transporteras med vattnet om de fastnade på kolloidala partiklar i grundvattnet. Halten kolloider i grundvattnet är mindre än 0,4 mg/l. De består av oorganiska partiklar, t ex kalcit, järnhydroxid, lera etc och kan givetvis sorbera radionuklider. Är upptaget av radionuklider på kolloidala partiklar reversibelt så spelar det ingen roll för transporten. Någonstans längs strömbanan lämnas nukliden då över till berget. Skulle däremot nukliden fastna irreversibelt kommer nukliden att transporteras med partikeln och i sämsta fall inte fördröjas alls genom sorption i berget. Laboratorieförsök bekräftar att sorptionen till stor del är reversibel. Styrkan i sorptionen svarar ungefär mot uppmätta K_d för motsvarande mineral och ämnen /5.5-90/.

Noggranna analyser av grundvattnet visar att det existerar bakterier även på stort djup. Alla arter har inte identifierats men metanbakterier och sulfatreducerande bakterier har påträffats. Miljön är fattig på näringsämnen. De ämnen som kan tänkas ingå i ämnesomsättningen för mikroorganismerna är bl a metan, väte, organiskt material, karbonat, sulfat, etc. Laboratorieförsök visar att bakterier kan ta upp radionuklider. I princip skulle radionuklider kunna följa med bakterier på samma sätt som med andra kolloidala partiklar i grundvattnet. Halterna av mikrober är emellertid mycket låga (mindre än 50 mg/m^3). Betydelsen av bakterietransport för säkerheten har analyserats på samma sätt som för oorganiska

kolloider och slutsatserna är att den har försumbar inverkan /5.5-90/.

Såväl i Sverige som i flera andra länder pågår en utveckling av mer detaljerade modeller för sorption och indiffusion som bättre skall beskriva de fysikaliska och kemiska förlopp som ingår /5.5-88/.

Matrisdiffusion av eventuella lösta radionuklider kan ske till de mikroporer i berget som omger de mer påtagliga sprickorna och zonerna. I senare skeden kan radionukliderna diffundera tillbaka till det flödande vattnet i sprickorna. Dessa processer har påtagliga effekter på transporten av såväl icke-sorberande som sorberande radionuklider. För de sorberande nukliderna är de relativt sett stora ytorna i mikroporerna väsentliga. De viktigaste parametrarna som bestämmer indiffusionen till bergmatrisen är specifik yta, diffusionskoefficienten och diffusionsporositeten /5.5-77, 92/.

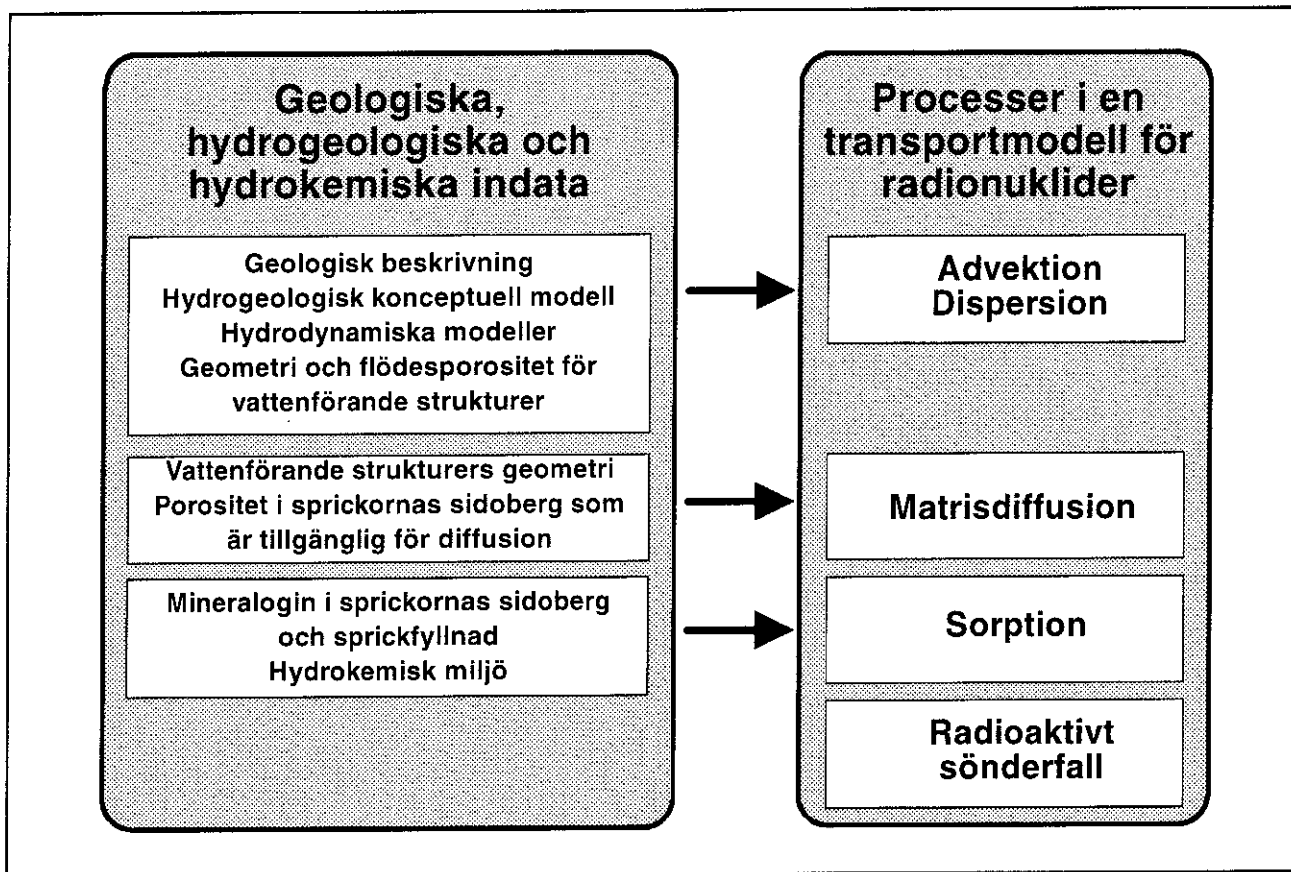
Gastransport av nuklider är en möjlig spridningsmekanism. Transport med naturligt förekommande gaser (geogas) och transport med vätgas producerad från eventuell kapselkorrosion är tänkbara.

Angående geogastransport har det t ex hävdats att spårämnen av metaller kan transporteras med gasbubblor i berget /5.5-96/. Slutsatsen bygger på analyser av jordgas ovanför relativt djupt belägna malmkroppar. Gasen har innehållit spår av metall från malmen. Men halten metall i gasen jämfört med mängden metall i malmen visar att det är ytterst små mängder som skulle kunna frigöras och transporteras till biosfären på detta sätt. För att det skall kunna bildas gasbubblor måste vattnet vara mättat med gas vid de tryck som råder på förvarsdjup. Erfarenheter från Äspöprojektet visar att grundvattnet på aktuellt djup är kraftigt undermättat med avseende på lösta gaser, som till mer än 90% utgörs av kväve. Djupet vid vilket den uppmätta lösta mängden gas övergår i en separat gasfas ligger ej djupare än ca 50 m /5.5-89/.

Vätgas kan bildas genom anaerobisk korrosion av järn om vatten skulle tränga in i en koppar-stålkapsel, se kapitel 6. Vätgasen kan vara bärare av radionuklider som förekommer i gasfas, t ex ^{14}C , ^{85}Kr . Om vätgasen passerar bentonitbuffert och återfyllning visar modellberäkningar att förutsättningar finns för en direkt gastransport till markytan från djupförvaret /5.5-97/. För att inte underskatta effekterna av nuklidtransport i ren gasfas i SKBs säkerhetsanalyser antas en direkt kortslutning mellan närområdet och biosfären. En allmän kunskapsuppbyggnad om gasmigration och tvåfasflöde har påbörjats vid Äspölaboratoriet.

Karaktärisering av sprickor med hänsyn till nuklidtransport och retardation

Flödesberäkningar och retardationsbedömningar måste på en berggrundens heterogenitet med nödvändighet baseras på vissa antaganden. T ex kan man vid en transportmodellering ansätta ett kanalflöde med konstant vattenkemi, hydraulisk gradient, sprickmineralogi och porositet längs hela flödesbanan.



Figur 5.5-9. Användning av geologisk, hydrogeologisk och hydrokemisk information vid modellering av radionuklidtransport – en översikt av parametrar och processer (efter /5.5-19/).

En transportmodell kan vara mer eller mindre förankrad i den geologiska verkligheten. En sprickas karaktäristika t ex porositet, sprickmineraliseringar, är naturligtvis ett resultat av berggrundens bildningssätt och utveckling i det geologiska tidsperspektivet. SKB har under senare år påbörjat och genomfört flera projekt med det övergripande målet att förbättra klassificeringen av enskilda sprickor och spricksystem med inriktning på radionuklidtransport och retardation. Därvid karaktäriseras sprickor med hänsyn till bergartstyp, tektonisk utveckling, mineraliseringar och omvandlingar i sprickornas närhet. Inför genomförandet av spårämnesförsök vid Äspölaboratoriet tillämpas och testas en sprickkaraktärisering med denna inriktning /5.5-19/

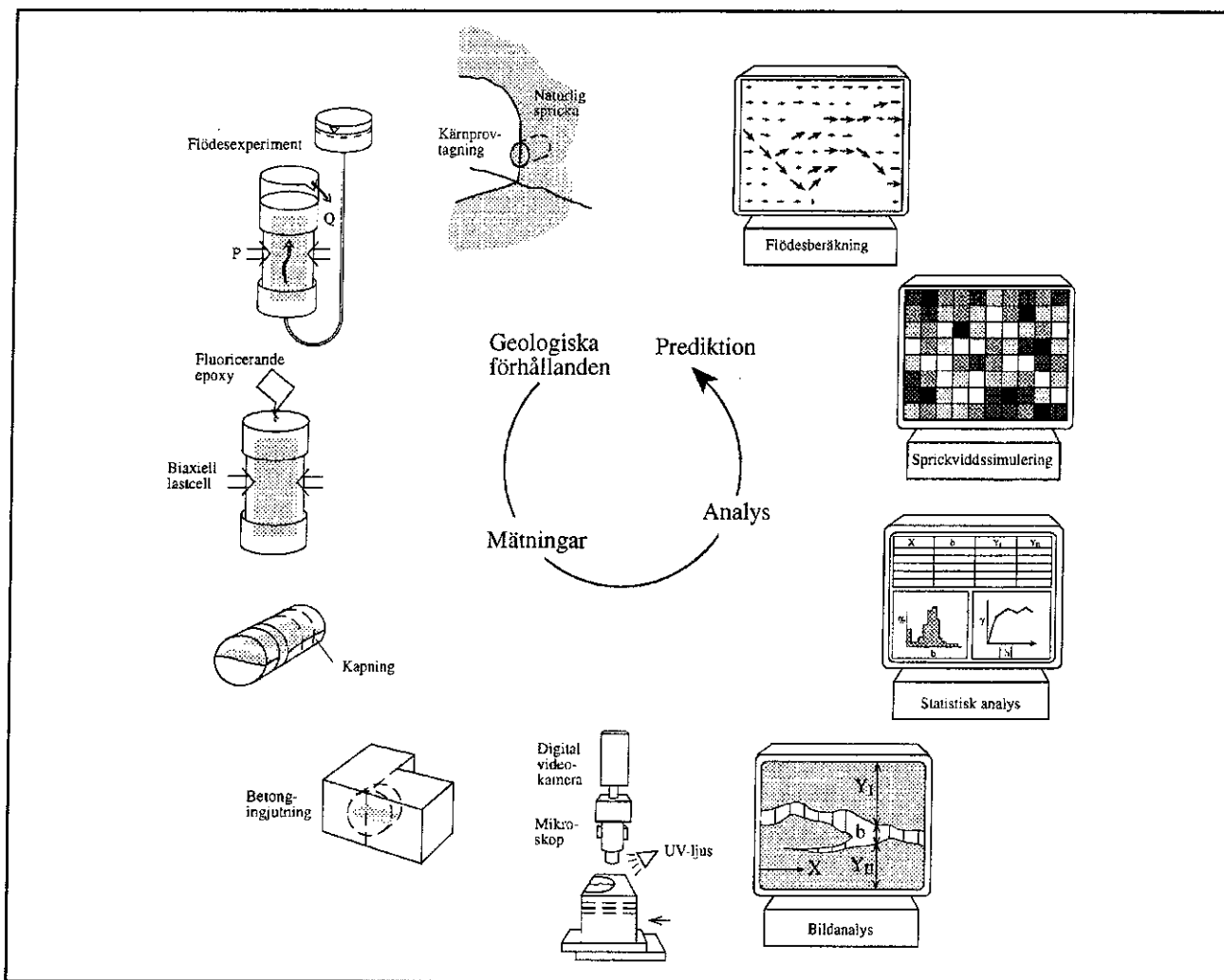
Såväl kvantitativ som kvalitativ förståelse av sprickkaraktäristika kommer att öka i takt med att resultat från underjordslaboratorier blir tillgängliga. Detta ämnesområde har hög prioritet när experiment-verksamheten påbörjas i Äspöprojektet.

Figur 5.5-9 ger en sammanfattning av geologiska, hydrogeologiska och hydrokemiska data med inriktning på

de processer i en transportmodell som översiktligt kommenterats i de tidigare avsnitten i detta kapitel.

Flera viktiga resultat har presenterats vad gäller hydrotermalt påverkad bergmatris omkring sprickor. För de mer rödfärgade partierna nära sprickor i Äspötunneln konstateras exempelvis förhöjd porositet, lägre densitet, starkt reducerad magnetisk susceptibilitet. Vidare konstaterades vid studien att de omvandlade partierna förlorat kalciumjoner på bekostnad av kalium och natrium (albitisering). Rödfärgningen i Äspö är avhängig en oxidation av magnetitmineral till hematit och järnhydroxider. Dessa iakttagelser visar på egenskaper i sprickytorna som bidrar till stark retardation av lösta ämnen /5.5-83/.

Ett mål är att vidareutveckla förståelsen av sprickflöden med hänsyn till de detaljerade geometriska förutsättningar som råder i en enskild spricka. SKB har låtit tillverka en speciell laboratorietrustning, en biaxialcell, där samband mellan bergspänningar över enskilda sprickor och grundvattenflöden studeras. En halv meter långa borrhäror med en diameter av 200 mm kan place-



Figur 5.5-10. Kartläggning av sprickgeometrier och sprickflöde – projektstruktur.

ras i cellen. Cellen finns vid Chalmers Tekniska Högskola och bildbearbetningsanalys av sprickor sker vid Kungl Tekniska Högskolan, se Figur 5.5-10. Bland resultaten kan konstateras att kvoten mellan mekanisk och hydraulisk medelsprickvidd är ca 1,4 /5.5-84, 119, 120/.

Verksamheten i förhållande till mål i FUD-program 92

I FUD-program 92, uppställdes ett antal mål för FoU-arbetet för perioden 1993 - 1998, om bergets förmåga att begränsa transport. Här följer en kort lägesredovisning i relation till målen:

- Vidareutveckla metoder för beskrivning av sprickors geometri och deras hydrauliska egenskaper. – Detta är ett centralt forskningsområde inom SKBs verksamhet. Sammanställningar görs fortlöpande, bl a med material från Äspöprojektet.
- Vidareutveckla in situ-metoder för bestämning och analys av hydrauliska egenskaper i sprickigt berg. –

Metodutveckling har skett vid Äspöprojektet och i Laxemar djuphål. En separat arbetsgrupp har nyligen sammanställt en "state-of-the-art" rapport /5.5-69/.

- Utredda de hydrauliska egenskapernas storskaliga beroende av sprickmineraliseringar, bergspänningar och tidigare permafrostdjup. – Arbeten pågår med huvudsaklig inriktning på korrelation mellan genomsläpplighet och bergspänningar. Därvid utnyttjas framförallt SGUs brunnsarkiv, typområdesresultat och den av SKB sammanställda rikstäckande databasen för bergspänningar.
- Utredda och sammanställa indirekta tecken på grundvattnets flödesmönster i sprickigt berg för såväl modellstrukturering som bekräftelse av modeller. – Projekt för karaktärisering och klassificering av sprickor pågår i samarbete med NAGRA, Schweiz. Metoderna testas i Äspölaboratoriet.
- Utredda risker för kortvariga tryckförändringar i grundvattenmagasinet på förvarsnivå p g a jordbäv-

ningar. – Samarbete har inletts med PNC, Japan och SKB medverkar i ett projekt med denna inriktning i forskningsgruvan Kamaishi.

- Vidareutveckla teorier för "icke-reaktiv" – flödes-transport i sprickor och system av sprickor. – Bl a har separata laboratoriestudier genomförts i samarbete med Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg och Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.

5.5.7 Projekt "Djupborrning KLX 02 – Laxemar"

I avsnitten 5.5.4 - 5.5.6 behandlas var för sig, kunskapsläget med hänsyn till bergets mekaniska stabilitet, vattenkemiska miljö och förmåga till radionuklidretardation. I ett integrerat, mindre projekt "Djupborrning KLX 02 – Laxemar" studeras såväl mekaniska, hydrauliska, termiska som kemiska aspekter i fält. Projektet, som genomförs vid sidan av Äspölaboratoriet, initierades under hösten 1992 med följande mål:

- att bredda kunskaperna om bergets sammansättning och egenskaper på större djup samt att erhålla ny information avseende grundvattnets strömningsmönster och kemiska sammansättning.

Projektet har vidare haft delmålen:

- att påvisa olika borrhningstekniska möjligheter för undersökningsborrning till större djup och att demonstrera sådan borrhning till ca 1500 m under markytan,
- att demonstrera metoder för undersökningar i borrhål inom djupintervallet 1000 - 1500 m.

Borrhningen av KLX 02 genomfördes under tiden oktober-november 1992 till 1700 m djup med sk "wire-line teknik". En intakt borrhkärl finns för intervallet 200 - 1700 m. Efter borrhningen har undersökningsverksamheten omfattat geologisk kartering, mineralogi, geofysiska mätningar, grundvattenkemi och grundvattenhydraulik. En utrustning har modifierats för att mäta bergspänningar på nivåer djupare än 1000 m, /5.5-121-130, 145/. Det djupa borrhålet KLX 02 vid Laxemar erbjuder väsentliga indata till SKBs paleohydrogeologiska program, se avsnitt 5.5.8.

Eftersom hålet borrhats 1700 m ger det även betydelsefull information till det program inom SKB som behandlar det alternativa förvarskonceptet "Djupa hål", se avsnitt 13.2.

5.5.8 Modellverktyg och modellutveckling

Matematiska modeller för grundvattenströmning, nuklidtransport och bergmekanik utgör viktiga verktyg i arbetet

med avfallsdeponeringen. I takt med datorernas alltmer ökade beräkningskapacitet utvecklas numeriska modellkoder vid sidan av rent analytiska ekvationslösningar och empiriska samband. Förutsättningarna att lösa beräkningsproblem med olika kopplade fysikaliska och kemiska processer har också ökat under senare år.

I avsnitt 5.1 redovisas SKBs övergripande syn på modellbegrepp och hur modeller används i verksamheten. Det matematiska verktyget för att beräkna och beskriva en kemisk eller fysikalisk process kan vara en numerisk modell eller en analytisk ekvationslösning. Antaganden, förenklingar och samband som utnyttjas för beräkningen framgår av en sk konceptuell modell. Den konceptuella modellen är således en beskrivning av hur de geometriska förutsättningarna (strukturen) och de ingående processerna är organiserade och representerade, /5.5-85/. För att sedan genomföra själva beräkningen krävs indata.

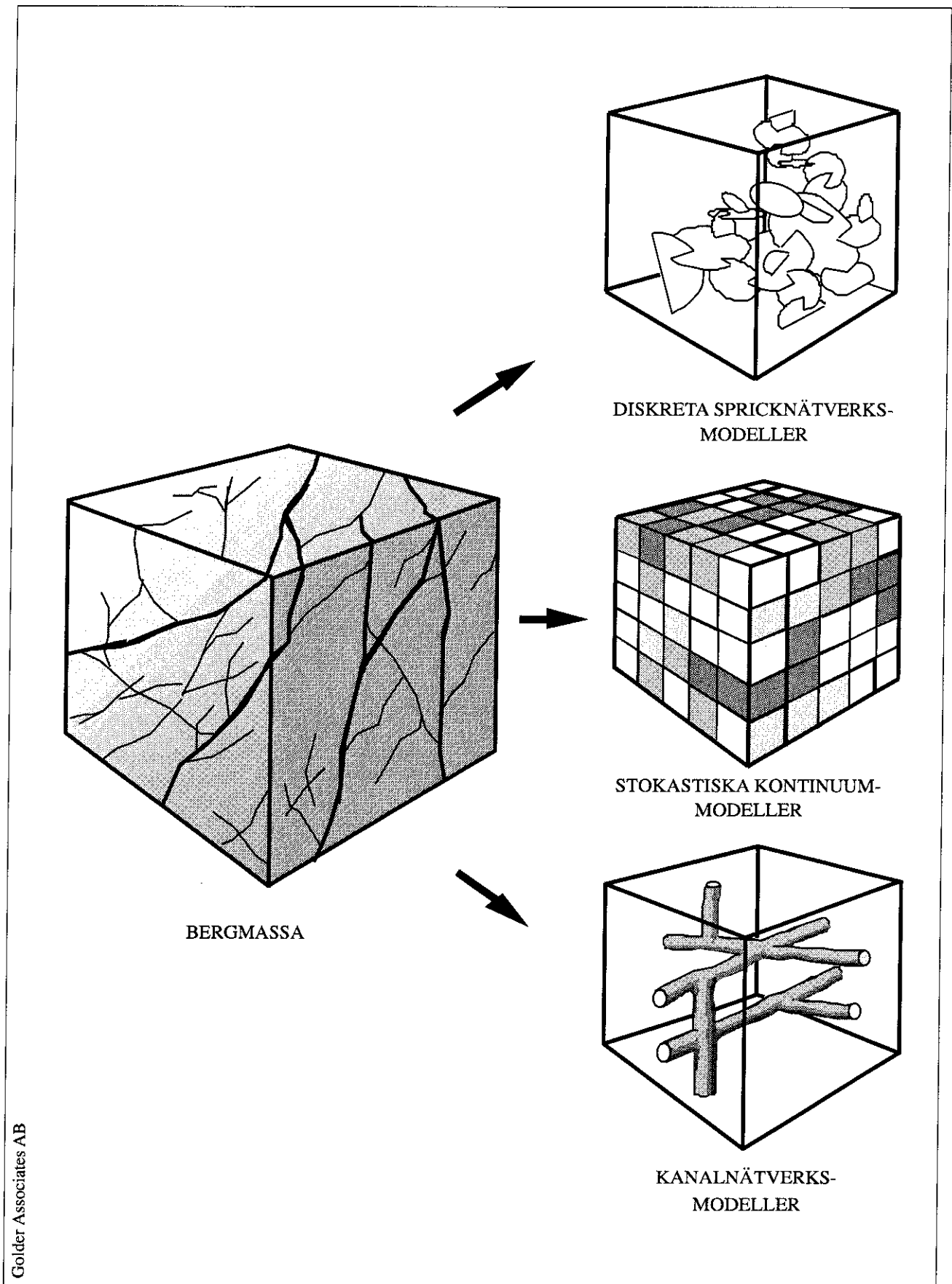
För SKBs del har insatserna när det gäller modellutveckling koncentrerats till nödvändiga beräkningsverktyg vid funktions- och säkerhetsanalyser, vid Äspölaboratoriet samt vid Stripaprojektet.

Grundvattenmodellering

Modellering av grundvattenflöde och grundvattentransport av lösta ämnen i sprickigt, lågpermeabelt berg är relativt komplex jämförd med geologiska porösa medier. Förbindelser mellan sprickor formerar flödesvägar som kan vara mycket oregelbundna. För att beskriva grundvattenflödet i berggrunden krävs att bergets heterogena struktur representeras i modellerna och att hänsyn tas till den skala i vilken man betraktar beräkningsproblemet. Olika typer av angreppssätt, konceptuella modeller, används och dessa kan sägas representera olika idealiseringar av hur grundvattnet strömmar. Den konceptuella modellen är utgångspunkten för den matematiska modellen som innehåller ekvationer vilka löses analytiskt eller numeriskt. Tre olika angreppssätt visas i Figur 5.5-11.

Diskret spricknätverks-modellering (DFN) är intuitivt tilltalande eftersom de primära flödesvägarna antas vara representerade av ett nät med sammanbundna sprickplan. Modellen byggs upp utifrån en statistisk beskrivning av de enskilda sprickornas geometriska och hydrauliska egenskaper. För detta behövs data som ger fördelningar av förekommande sprickors position, längd, orientering och transmissivitet. Olika sprickpopulationer kan därefter simuleras baserade på denna statistik.

Stokastisk kontinuum-modellering (SC) baseras på antagandet att egenskaper i berget (hydraulisk konduktivitet, magasin-koefficient, etc) kan beskrivas som variationer med rumsliga fördelnings-funktioner. Det stokastiska angreppssättet innehåller flera moment av geostatistik. Stokastisk kontinuum-modellering används med fördel vid analyser då man vill studera regionala skalor (km-skala) samt vid sk betingad simulering med hjälp av tex kriging. Klassisk eller deterministisk kontinuum-modellering kan sägas utgöra ett specialfall av stokastisk kontinuum-modellering.



Figur 5.5-II. Tre vanliga angreppssätt för att modellera grundvattenflöde och grundvattentransport i sprickig berggrund (från /5.5-98/).

Kanalnätverks-modellering (CN) representerar flödet i sprickigt berg som begränsade, diskreta och i huvudsak endimensionella strömningsvägar, kanaler, vilka skär varandra med vissa mellanrum. Angreppssättet baseras på iakttagelser i fält, huvudsakligen från tunnlar, där grundvatten ofta uppträder som flöden utmed kanaler i bergets sprickor. Kanalernas egenskaper härleds från fältdata. Mätningar av kanalvidder är nödvändiga. Fältmätningar i tunnarnas sprickor är dock behäftade med osäkerheter p g a de störningar i berget som själva tunnelarbetet åstadkommit.

En utförligare beskrivning av dessa grundkoncept ges i SKB-redovisningar, t ex /5.5-98/ eller /5.5-99/. Ytterligare detaljer om de tre koncepten med speciell inriktning mot databehovet beskrivs ingående i separata rapporter /5.5-100, 101, 102/.

Valet av modell vid en analys beror helt och hållet på syftet med analysen i fråga, vilken geometrisk skala som avses studeras samt på tillgängliga data. Oavsett modellkoncept finns ett antal gemensamma centrala frågor att beakta vid grundvattenmodellering.

Randvillkoren påverkar beräkningsresultaten. Osäkerheter kan gälla i vilken utsträckning grundvattenrörelserna på förvarsdjupet, vid sidan av det regionala grundvattnensystemet, influeras av lokal topografi i kombination med brantstående vattenförande strukturer, /5.5-103/. När man vid modelleringen tar hänsyn till densitetsskillnader i grundvattnet, orsakat av salthaltsvariationer, måste även detta behandlas vid valet av randvillkor.

Hanteringen av dominerande vattenförande strukturer vid modellering sker olika beroende på modellkoncept. Berggrundens heterogenitet med de stora skillnaderna i materialegenskaper ger såväl konceptuella osäkerheter som numeriska svårigheter vid modelleringen.

Indata till modelleringarna erhålls från olika fältundersökningar i borrhål. Dessa är utförda i en viss geometrisk skala. Det kan vara osäkert vilken bergvolym som själva testerna representerar, se avsnitt 5.5.6. Vid modelleringen är det nödvändigt att skala ner eller upp den tillgängliga framtolkade informationen från fältdata för att passa genomförandet av den numeriska beräkningen. Denna skalanpassning kräver extra omsorg vid modelleringen /5.5-104/.

Modellering av radionuklidtransport

Modellering av grundvattenflöde och grundvattentransport av lösta ämnen sker företrädesvis i ett sammanhang. I en säkerhetsanalys behandlas emellertid ofta flödet/advektionen med en grundvattenmodell (inkl dispersion, för vissa modellkoncept) samt diffusion, dispersion och retardation med en fristående nuklidtransportmodell. Denna uppdelningen medför att flödesmodellen ger randvillkor till transportmodellen i form av längd på transportvägar eller alternativt vattentransporttider.

Transportprocesserna vilka diskuteras i början av avsnitt 5.5.6 behandlas sammanfattningsvis på följande sätt i de numeriska modellerna:

- **Advektion** med grundvattnet: Medelhastigheten för grundvattnet modelleras ofta som darcy-hastigheten dividerad med flödesporositeten. Flödesporositet är den andel av berget som upptas av flödande grundvattnet och den är mindre än den totala porositeten.
- Molekylär **diffusion** beskrivs av Ficks lag.
- Hydrodynamisk **dispersion**: Modelleras vanligen med en diffusionsterm proportionell mot grundvattnets hastighet, transversell dispersion är ofta mycket mindre än den longitudinella. Detta förfarande ger att massflödet av ett ämne längs med flödet i berget ges av produkten av koncentrations-gradienten, grundvattnets hastighet och en koefficient kallad longitudinell dispersionslängd. Den sistnämnda kan vara mycket osäker att uppskatta beroende på svårigheten att utföra spår försök i sprickigt berg över lämpliga längdskalor. Det i fält konstaterade skalberoendet för dispersionskoefficienten simuleras ibland genom användande av en konstant, s k Peclets tal. Peclets tal representerar kvoten mellan en karakteristisk tid för dispersiv transport och en karakteristisk tid för advektiv transport. Parametern ingår i den advektions-dispersionsformulering för partikeltransport i berg som ofta används i säkerhetsanalyssammanhang. För en utförlig diskussion i detta ämne hänvisas till /5.5-77 eller 82/.
- Kemisk och fysikalisk **retardation**: Sorptionsmodellerna baseras ofta på antagandet att det egentliga kinematiska beteendet kan förenklas och modelleras med en linjär jämviktsmodell. För detta ansätts fördelningskoefficienter, K_d -värden, för varje nuklid. K_d -värdena tas fram i laboratorieförsök och anger förhållandet mellan koncentrationen i den fasta fasen och i den lösta fasen. Jämviktsmodellen gäller om koncentrationerna är små och om sorptionens tidsskala är mycket mindre än tidsskalan för transport med advektion och dispersion. Fysikalisk retardation genom indiffusion i berget hanteras vid modellering vanligtvis genom en dubbel-porositetsbeskrivning av det sprickiga mediet. En utbytesterm mellan sprickorna och det intakta berget (bergmatrisen) tas med vid analysen. Transporten i sprickorna är advektionsdominerad medan transporten mellan sprickorna och det intakta berget är diffusionsdominerad /5.5-77/.
- Det **radioaktiva sönderfallet**, inklusive kedjesönderfall, behandlas också vid modellering av nuklidtransporten.

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 endast begränsade effekter av rörelser längs diskontinuiteter kan beaktas. Kontinuummodellerna kan vara av differentiell eller integrerad typ. Finita element (FEM) och finita differenser (FDM) är exempel på differentiella metoder medan så kallade "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 /5.5-93/.

Kopplade modeller

Djupförvarets påverkan på bergmassan är ett kopplat fenomen som förutom kemiska reaktioner innehåller termiska, hydrologiska och mekaniska processer. Dessa processer påverkar varandra ömsesidigt i mer eller mindre utsträckning. Under senare år har intresset ökat för att utveckla så kallade kopplade modeller. Detta för att med större realism kunna beskriva förhållandena speciellt i närzonen vid ett förvar /5.5-94, 95/. För de komplexa samband som skall beskrivas i de kopplade processerna kan analytiska beräkningsmetoder mycket sällan tillämpas. Utvecklingen sker med numeriska ekvationslösare, vilka kräver omfattande verifiering.

I det så kallade DECOVALEX-projektet (international cooperative project for the DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments in nuclear waste isolation) har kopplade termo-hydro-mekaniska modeller utvecklats och verifierats /5.5-22, 23, 24/. Från projektets första etapp är slutsatserna bl a att temperaturfältet runt ett förvar låter sig väl beskrivas som rena värmeledningsproblem utan hänsyn till hydro-mekanisk koppling. Spännings- och förskjutningsförhållanden är ofta konsistenta för olika modelleringskoncept medan de hydrauliska resultaten visat påtagliga olikheter. Resultatens allmängiltighet är också mycket känsliga för val randvillkor med hänsyn till om beräkningsfallen är två- eller tredimensionella /5.5-112/.

Äspölaboratoriets internationella arbetsgrupp för modellering

Ett av Äspöprojektets mål är att "testa modeller för beskrivning av grundvattenflöde och nuklidtransport". Un-

der förundersökningsskedet och konstruktionsfasen har modelleringsarbetet huvudsakligen behandlat grundvattenflöde. Viss verksamhet har ägnats transport av lösta ämnen, främst salt grundvatten samt utvärdering av ett spårämnesförsök. Modelleringar har även underlättat Äspölaboratoriets experimentplanering med designberäkningar.

Till Äspölaboratoriet har knutits en internationell arbetsgrupp för modellering (Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes). Gruppen initierades av SKB i slutet av 1992. I Tabell 5.5-2 redovisas de aktiva grupperna och de modelleringar som hittills utförts. Arbetsuppgifterna har hittills omfattat: ett storskaligt långtidspumptest (Task 1), designberäkningar för kommande spårämnesförsök (Task 2) samt hydraulisk påverkan av Äspötunneln (Task 3). I tabellen presenteras i förekommande fall även de modellkoncept som utnyttjats. Modellresultaten presenteras i Äspölaboratoriets internationella rapportserie, /5.5-73, 108-111, 113-116/.

Arbetsgruppen är ett forum för de organisationer som deltar i det internationella samarbetet inom Äspölaboratoriet. I arbetsgruppen ingår även representanter för NAGRA (Schweiz), AECL (Canada) och BMBF (Tyskland). Tonvikten är lagd på att vinna förtroende för och erfarenheter av de metoder som används i funktions- och säkerhetsanalyser. Gruppen har även utarbetat en sammanställning över säkerhetsanalysernas nyckelfrågor (Issue Evaluation Table), vilka relateras till de pågående eller kommande experimenten vid Äspölaboratoriet. Denna sammanställning skall även tjäna som underlag för att välja kommande modelleringsuppgifter.

Paleohydrogeologiskt program och regional modellering

Säkerhetsanalysens referensscenario behandlar en klimatsituation motsvarande dagens och där de ingående geovetenskapliga parametrarna och randvillkoren ej förändras med tiden. Men extrema och med nödvändighet spekulativa scenarier förknippas även verkningar av eventuella framtida perioder med permafrost och glaciation. Frågorna gäller funktionen hos ett djupförvar och de radiologiska riskerna för människor, djurliv och vegetation efter nästa istid.

Utifrån kunskapen om Weichselnedisningens utbredning vid olika skeden samt indirekta klimatdata från pollen- och isotopanalyser har SKB låtit utveckla en tidsberoende glaciationsmodell /5.5-32, 33, 118/. Modellen, som finns i två- och tredimensionell version, har möjligheten att hantera kopplade processer med:

- temperaturförändringar i is och berggrund,
- inlandsisens tillväxt och flöde i landskapet med verklig topografi,
- generaliserad mekanisk påverkan på litosfären,
- smältvattenflöden vid olika skeden under en glaciationscykel.

Tabell 5.5-2. Sammanfattning av organisationer och modellgrupper med sina datorkoder i Äspölaboratoriets internationella arbetsgrupp för modellering. I tabellen framgår även de beräkningsuppgifter som behandlats under åren 1992-1995. (*) T=Task

ORGANISATION	MODELLGRUPP	KONCEPTUELL MODELL	DATORKOD	BERÄKNING UPPGIFT(*)
ANDRA Frankrike	BRGM(I) BRGM(II) ITASCA	kontinuum kontinuum kanalnätverk	MARTHE/SESAME ROCKFLOW CHANNET/TRIPAR	T1 T1 T1, T3
CRIEPI Japan	CRIEPI	kontinuum	FEGM/FERM	T1, T3
PNC Japan	PNC/Golder Hazama	diskret spricknätverk stokastisk kontinuum	FracMan/MAFIC SETRA/ARRANG	T1, T3 T1
SKB	CFE	stokastisk kontinuum	PHOENICS/PARTRAK	T1, T2, T3
SKB	KTH, Kemisk apparatteknik	kanalnätverk kontinuum	CHAN3D -	T1 T2
SKB	KTH, Vattenvårdsteknik	stokastisk kontinuum	TUBA, etc	T2
SKB	Geosigma	kontinuum	SUTRA	T2
TVO Finland	VTT (flöde) VTT (transport)	kontinuum -	FEFLOW -	T1, T3 T1
UK NIREX Storbritannien	AEA Technology	kontinuum/diskret spricknätverk	NAMMU/NAPSAC	T1, T3
US DOE USA	LBL	ekvivalent diskontinuum med invers modellering	-	T2

Till modellen har även fogats en enkel modellkod för grundvattenflöde med avsikten att kunna hantera och beskriva hydrogeologiska förändringar vid permafrost, glaciation och deglaciation. Av speciellt intresse är exempelvis tryck- och gradientförändringar under isen och i berggrunden. Grundvattenmodellen ger också möjligheter att på ett förenklat vis följa flödesförloppet av infiltrerat smältvatten.

Utvecklingsarbetet med glaciationsmodellen har haft två syften, nämligen att:

- genom bättre förståelse av termo-hydro-mekaniskt och kemiskt kopplade processer och deras utveckling öka tillförlitligheten i de prognosticerande beräkningsmodeller över långa tidsrymder som används (paleohydrogeologiskt program),

- skapa bättre underlag vid hantering av extrema framtida scenarier som inbegriper permafrost, glaciation och deglaciation.

Den av SKB framtagna glaciationsmodellen gör det alltså möjligt att med god underbyggnad diskutera och motivera scenarier för ett djupförvars framtida funktion och säkerhet. Platsspecifika data skall så långt möjligt ingå i analysen. De hydrauliska aspekterna är av centralt intresse men även termiska, mekaniska liksom vissa vattenkemiska förhållanden låter sig behandlas.

För närvarande pågår ett utvecklingsprojekt med grundvattenmodellering i ett regionalt perspektiv. Regionen omfattar Simpevarpshalvön, Äspö och Laxemarområdet norr om Oskarshamn. Projektet har en paleohydrogeologisk inriktning, d v s modelleringsresultat

avseende grundvattenflöde och transport av lösta salter jämförs med vattenkemiska analyser från Äspölaboratoriet och det 1700 m djupa borrhålet KLX 02, Laxemar, se även avsnitt 5.5.7. Ett separat program för verksamheten med alla dess integrerade delar har sammanställts /5.5-158/.

Datahantering

Ett beräkningsproblem inom tillämpad geologi består av såväl kvantitativa som kvalitativa data. När man värderar stora mängder av data och hur de kan användas måste man ta hänsyn till mät- och tolkningsmetoder, representativ dimension och från vilken geologisk enhet prover har tagits etc, se även avsnitt 5.5.2.

Internationellt pågår ett omfattande utvecklingsarbete när det gäller geostatistiska analysmetoder och deras praktiska tillämpning, se exempelvis /5.5-131–137/. Verksamheten vid SKB har huvudsakligen inriktats på att:

- utveckla och tillämpa metoder för statistisk inferens, d v s begränsa osäkerheterna som gäller egenskaper i berget utanför själva mätpunkterna och även kunna ansätta ett värde för hur tillförlitligt dessa egenskaper beskrivs. Detta sker exempelvis med variogramanalys och/eller genom att använda metoder för s k icke-parametrisk geostatistik,
- utveckla metoder för att analysera om data är statistiskt stationära eller ej (en parameter är stationär om både medelvärde och varians är oberoende av "provtagningsskala" eller geologisk enhet),
- utveckla och tillämpa regressionsmetoder, främst multivariatanalys, för vattenkemiska data,
- vidareutveckla och tillämpa metoder för hydrogeologisk klassificering i en lokaliseringssprocess med successiv uppdatering av tillgänglig information enligt Markov-Bayes geostatistiska modell.

Arbeten med ovanstående inriktning har presenterats i olika artiklar och SKB-publikationer, se exempelvis /5.5-117, 138–144/.

Verksamheten i förhållande till mål i FUD-program 92

I FUD-program 92 uppställdes ett antal mål för modellverktyg och modellutveckling för perioden 1993 - 1998. Här följer en kort lägesredovisning i relation till målen:

- Beskriva förutsättningar för grundvattenflöde och transport vid ett djupförvar i ett regionalt perspektiv under dagens klimatsituation. – Ett separat utvecklingsprogram pågår som exemplifieras med data från Äspö-Laxemar regionen.

- Beskriva förutsättningarna för grundvattenflöde och transport vid ett djupförvar i ett regionalt perspektiv under glaciation och deglaciation. – En tidsberoende glaciationsmodell för Skandinavien har utvecklats /5.5-32/. Till modellen har kopplats en finit elementkod som kan hantera smältvatten- och grundvattenflöden under en glaciationscykel. I samordning med ovanstående program testas modellerna med paleo-hydrogeologisk inriktning.
- Sammanställa och strukturera geostatistiska data som används vid säkerhetsanalys och byggbarhetsbedömning. – En separat sammanställning av faktorer ingår i SKBs kompletteringsredovisning till FUD-program 92.
- Vidareutveckla hur resultat från hydraultesters volymsrepresentativitet och dimensionalitet skall inordnas i en modellstruktur. – En arbetsgrupp, HYDRIS, har sammanställt olika aspekter på genomförande, tolkning och användning av provpumpningsresultat /5.5-69/. Utvecklingsarbete om volymsrepresentativitet i modellstruktureringen pågår.
- Integrera och ta hänsyn till allmän geologisk och geofysisk information i konduktivitetfördelningen för en platsspecifik stokastisk grundvattenmodellering (indikatorsimulering). – Exemplifierande beräkningar har genomförts och rapporterats /5.5-138/.
- Vidareutveckla modeller för konvektionsmodellering i sprickigt berg. – Utvecklingsarbete pågår.
- Vidareutveckla bergmekaniska stokastiska modeller samt vidareutveckla skalberoendet inom bergmekaniska modellstrukturer. – Viss modellutveckling har skett inom ramen för det internationella s k DECOVALEX-programmet /5.5-24/.
- Vidareutveckla kopplade hydro-termo-mekaniska modeller. – SKB har engagerat sig i flera modelleringssuppgifter i DECOVALEX-programmet.

5.6 KEMI

Resultaten av de tre senaste årens undersökningar inom kemiprogrammet finns redovisade i ett antal rapporter, publikationer och avhandlingar. Sammanfattningar och hänvisningar till det här materialet finns i SKBs Annual Reports (se text /5.6-5/). I avsnitt 5.5.6 görs en genomgång av bergets förmåga att genom olika berggrundsrelaterade faktorer påverka nuklidtransporten.

Genomgången nedan är medvetet kortfattad för att inte bli betungande för den som snabbt vill skaffa sig en överblick över vad som har tillkommit sedan det förra FUD-programmet. SKBs Annual Reports ger fler detaljer och där finns referenser till alla underlagsrapporter samlade.

Kemiprogrammet med inriktning mot djupförvaring av använt bränsle har kommit en bra bit på väg. Omfattningen har därför minskats något och en del undersökningar har övergått från en allmän inriktning inom kemi-programmet till tillämpade studier. Vissa allmänna studier t ex löslighet, sorption, diffusion etc är numera koncentrerade till projektet för annat avfall (långlivat låg och medelaktivt avfall), se avsnitt 5.9.

5.6.1 Radionuklidkemi

Löslighet och komplexbildning

Flera av de radionuklider som finns i avfallet och är viktiga för den långsiktiga säkerheten har en låg löslighet både i grundvattnet och i bentonitlerans porvatten. Bildning av komplex påverkar lösligheten, t ex komplex med en aktinid som centralatom och hydroxid- eller karbonatjoner som ligander. Detta måste man ta hänsyn till. För att beräkna löslighet och speciering används termodynamiska data och modeller, och experiment genomförs för att förbättra dataunderlaget. SKB har medverkat till ett stort antal mätningar av konstanter för bildning av hydroxid- och karbonatkomplex med bl a fyervalent thorium, teknetium och neptunium, se Tabell 5.6-1 /5.6-1, 2, 3, 4/. Det har hävdats att även komplexbildning mellan fyervalenta aktinider och fosfat skulle vara av betydelse trots den låga koncentrationen av fosfat i grundvatten och bentonit. Slutsatsen baseras på databaser som innehåller äldre och felaktiga konstanter för komplexbildning med fosfat. Nya och noggrannare mätningar, som SKB har låtit utföra, se Tabell 5.6-2, /5.6-5/, visar att fosfatkomplexen i dessa sammanhang är mindre betydelsefulla.

Beträffande plutoniums kemi har SKB förberett nya undersökningar och detta är numera ett prioriterat område. Uppgiften är inte enkel då plutonium har en besvärlig kemi (flera olika möjliga redoxstillstånd) utöver att den ställer höga krav på radiologisk säkerhet på laboratoriet. Som exempel kan nämnas att den teknik som utvecklats med SKBs stöd, för att studera Np(IV) och Tc(IV) troligen inte går att använda för plutonium /5.6-4/.

För att kunna använda jämviktsberäkningar måste man bl a veta att reaktionerna äger rum. Därför har även reaktionskinetik undersökts, då det varit nödvändigt, t ex för att visa hur "lättroligt" perteknetat, d v s teknetium(VII), och neptunyl, d v s neptunium(V), reduceras till fyervalent teknetium och neptunium med låg löslighet och hög sorption /5.6-8/. Det är nu klarlagt att en sådan reduktion verkligen äger rum under de geokemiska förhållanden som råder i ett djupförvar.

Medfällning är alltså svår att utnyttja till fullo i transportberäkningar. SKB följer tillsvidare den internationella utvecklingen på området.

Sorption och diffusion

Sorption och diffusion är processer som påverkar radionuklidernas migration. Jonbyte och ytkomplexering an-

Tabell 5.6-1. Jämviktskonstanter för torium och neptunium(IV) i karbonathaltiga lösningar.

Jämviktsreaktion	Jämviktskonstant log K
Torium ^a	
$\text{ThO}_2(\text{s}) + 4\text{H}^+ = \text{Th}^{4+} + 2\text{H}_2\text{O}$	9.47±0.13
$\text{ThO}_2(\text{s}) + \text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_3^{2-} = \text{Th}(\text{OH})_3\text{CO}_3^-$	6.11±0.19
$\text{ThO}_2(\text{s}) + 4\text{H}^+ + 5\text{CO}_3^{2-} = \text{Th}(\text{CO}_3)_5^{5-} + 2\text{H}_2\text{O}$	42.12±0.32
Neptunium ^b	
$\text{Np}(\text{OH})_4(\text{s}) = \text{Np}(\text{OH})_4(\text{aq})$	-8.28±0.23
$\text{Np}(\text{OH})_4(\text{aq}) + \text{CO}_3^{2-} = \text{Np}(\text{OH})_4\text{CO}_3^{2-}$	3.00±0.12
$\text{Np}(\text{OH})_4(\text{aq}) + \text{HCO}_3^- = \text{Np}(\text{OH})_3\text{CO}_3^- + \text{H}_2\text{O}$	3.23±0.12
$\text{Np}^{4+} + 4\text{OH}^- = \text{Np}(\text{OH})_4(\text{aq})$	46.2±0.3
$\text{Np}^{4+} + 4\text{OH}^- + \text{CO}_3^{2-} = \text{Np}(\text{OH})_4\text{CO}_3^{2-}$	49.2±0.3
$\text{Np}^{4+} + 3\text{OH}^- + \text{CO}_3^{2-} = \text{Np}(\text{OH})_3\text{CO}_3^-$	45.2±0.3

a Referens /5.6-3/

b Referens /5.6-4/

Tabell 5.6-2. Experimentellt bestämda stabilitetskonstanter (log β) för toriumkomplex med fosfat /5.6-6/.

Komplex	Exp. pH 8.0	Exp. pH 9.0	Litteratur ⁽¹⁾
ThHPO_4^{2+}	$(5 \cdot 10^8)$	$(5 \cdot 10^9)$	$2 \cdot 10^{13}$
$\text{Th}(\text{HPO}_4)_2(\text{aq})$	$1 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{17}$	$3 \cdot 10^{26}$
$\text{Th}(\text{HPO}_4)_3^{2-}$	$1 \cdot 10^{21}$	$1 \cdot 10^{23}$	$8 \cdot 10^{34}$

(1) Moskvina et al. /5.6-7/.

vänds som modeller för att beskriva upptag av lösta radionuklider på mineralytor i berget och bentonitleran. SKB stödjer en rad sådana undersökningar. Resultaten av experimenten har inte använts för att ersätta sorptionskoefficienterna (K_d -värden), utan för att öka förståelsen av sorptionsmekanismerna och bestämma vad de är beroende av, d v s hur pålitlig sorptionen kan anses vara /5.6-9/.

Det finns fortfarande ingen bra metod att bestämma den flödesväta ytan men undersökningar pågår t ex inom Äspöprogrammet.

Kompletterande mätningar av diffusion i betong och bentonit har genomförts och pågår fortfarande. Beträffande bentonit så är inriktningen att bestämma data som beskriver genomdiffusion och sorption i bentonit.

En litteraturstudie har genomförts av indiffusion av radionuklider i berg /5.6-10/.

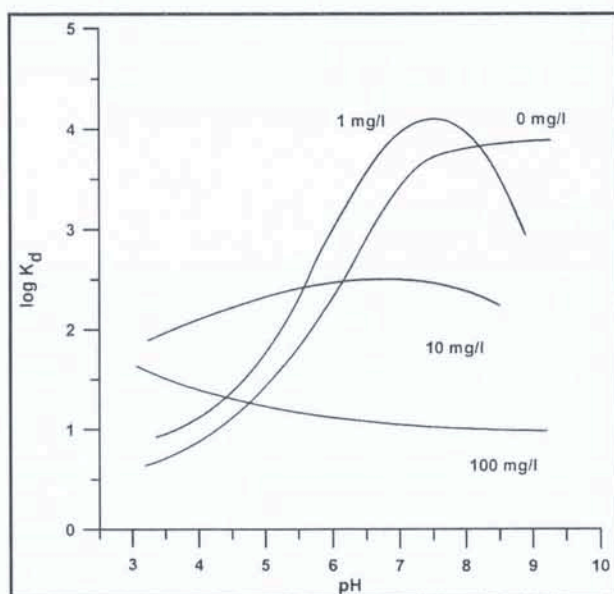
5.6.2 Organiska ämnen, kolloider och mikrober

Kolloider

Kolonnförsöken med kolloider och radionuklider är avslutade. Försöken visar att kolloider kan ta upp och transportera radionuklider, åtminstone under speciella betingelser /5.6-11/. Djupa grundvatten har emellertid så låga halter av kolloidala partiklar att de inte kan bidra till radionuklidspredning i någon nämnvärd omfattning /5.6-12/. Man har med andra ord kunnat visa att grundvattnets naturliga halt av kolloidala partiklar inte är av någon säkerhetsmässig betydelse. Däremot kan det finnas anledning att se på de ämnen som kommer från själva förvaret, t ex lerpartiklar från bentonitbufferten. Ett speciellt fall är transport med gasbubblor, som kommer att ägnas mer uppmärksamhet.

Organiska ämnen i grundvattnet

En serie laboratorieförsök med naturliga humus- och fulvosyror har genomförts som bekräftar att sorptionen av vissa radionuklider, t ex Am^{3+} , på mineral försämrats genom komplexbildning /5.6-13/. Emellertid visar samma försök att på grund av de låga halterna av naturliga humus- och fulvosyror i djupa grundvatten så är storleken på nedsättningen av radionuklid-sorptionen begränsad eller till och med försumbar, se Figur 5.6-1. Liknande slutsatser har man kommit till i flertalet av de länder som överväger att placera det högaktiva avfallet i ett djupförvar i granitiskt berg /5.6-15/. Allt organiskt material i grundvattnet är emellertid inte humus och fulvosyror, och det återstår alltjämt att bestämma vad övriga organiska ämnen i grund-



Figur 5.6-1. Inverkan av fulvosyror på sorptionen av Eu på aluminiumoxid vid olika pH och koncentrationer av fulvosyra.

vattnet består av och vad de har för kemiska egenskaper vis-à-vis radionuklider.

Mikrober

Det är väsentligt att utreda betydelsen av mikrober. Området har prioriterats sedan 1992. I princip kan mikrober inverka på en rad förhållanden av vikt för isoleringen av radioaktivt avfall, t ex migration, löslighet och gasbildning. Av störst betydelse är emellertid mikrobernas möjlighet att påverka den kemiska miljön som kapseln och avfallet kan komma i kontakt med. De analyser och undersökningar som gjorts t ex i samband med Äspölaboratoriet indikerar detta. Mikrober kan vara till fördel, genom att medverka till kemisk reduktion av syre och radionuklider, eller till nackdel genom att reducera sulfat till sulfid. Detta kan påverka bl a avfallskapseln och därför har förekomsten av mikrober ägnats särskild uppmärksamhet i kemiprogrammet.

Undersökningar av mikrober har intensifierats och provtagning har genomförts på Äspö och på flertalet av de platser där bl a analogiundersökningar genomförs, se Figur 5.6-2. Ett samarbete med AECL och ANDRA beträffande mikrobiella undersökningar av bufferten (sand/bentonit) som använts i ett kanadensiskt "Buffer Mass Test" i det underjordiska laboratoriet URL i Manitoba, har gett väsentlig information om bakterier i en bentonitbuffert.

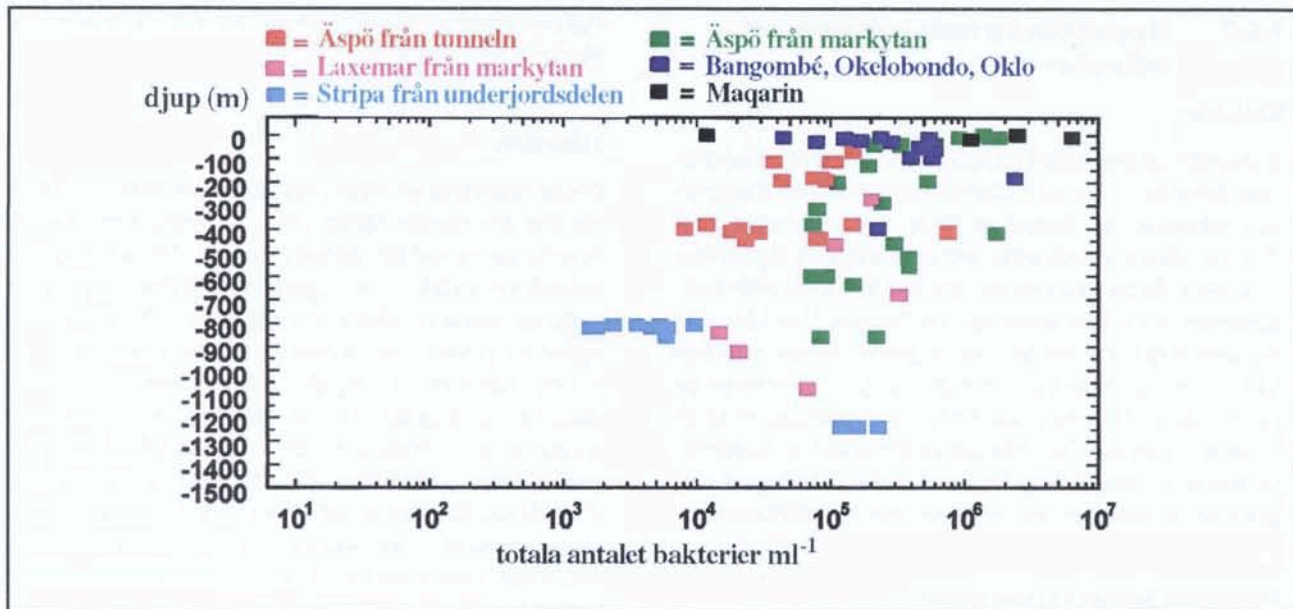
En sammanfattning av nuvarande kunskapsläge beträffande mikrober och deras betydelse för den långsiktiga säkerheten finns redovisad i en teknisk rapport /5.6-16/. Följande säkerhetsrelaterade områden behandlas i denna:

- Radionuklidtransport och bakterier.
- Komplexbildare från bakterier.
- Mikrobiella processer i ett förvar.
- Stålkorrosion och bakterier.
- Sulfatreducerande bakterier och kopparkorrosion.
- Bakteriell sulfatreduktion med vätgas.
- Förbrukning av syre med bakterier.
- Reducerande förhållanden och bakterier.
- Bakteriers livsbetingelser i bentonit.

5.6.3 Valideringsexperiment

Arbetet med att validera modeller och antaganden i funktions- och säkerhetsanalyser är idag inriktat på de in-situ experiment som skall genomföras med CHEMLAB-sonden i Äspö" se kapitel 12. Målsättningen för CHEMLAB-experimenten är att pröva de modeller som används för att beskriva upplösning och migration av radionuklider. Dessa experiment förbereds i laboratorium. I bänkskala prövas genomförandet av de försök som vi sedan vill utföra in-situ i sonden CHEMLAB.

Betong används ofta vid byggande under jord, t ex golvbeläggning, sprutbetong på väggar och tak, injektering av bergsprickor, konstruktioner av olika slag, etc.



Figur 5.6-2. Totala antalet bakterier i grundvattnet. Prover har tagits ned till 1240 m under 9 års tid och från 30 borrhål ur totalt 49 olika sektioner.

Vanlig anläggningscement av Portlandtyp innehåller alkalihydroxider (NaOH och KOH) och portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) som ger betongens porvatten ett högt pH. För att utröna den långsiktiga geokemiska inverkan av betong har experiment genomförts där simulerat cementporvatten fått rinna genom kolonner med granitiska mineral. Genom reaktioner med silikatmineral bildas s k kalcium-silika-hydrat-faser. Reaktionen går mycket långsamt och de nya fasta faserna som bildas tenderar att sätta igen kolonnerna. Försöken utförs av BGS (British Geological Survey) i Storbritannien med stöd av NAGRA, NIREX och SKB. Målsättningen är att validera de modeller som används. Den första fasen av experimenten i England har avrapporterats /5.6-19/.

5.6.4 Miljöfarliga ämnen

Det väsentliga forskningsarbetet berör avfallets radiologiska toxicitet. En liten del av de ämnen som ingår i avfallet kan emellertid klassas som miljöfarligt avfall. Det gäller främst en del metaller som t ex bly, kadmium och beryllium. Detta har undersökts i samband med såväl det högaktiva avfallet (använt bränsle) som det låg och medelaktiva. Miljöfarliga ämnen har inventerats och metoder att redovisa säkerheten för de här ämnena i ett förvar har prövats. SKB har funnit att djupförvaret ger ett mycket gott skydd även mot dessa ämnen /5.6-20/.

5.7 NATURLIGA ANALOGIER

5.7.1 Naturliga analogier och säkerhetsanalys

Det finns nu en betydande mängd resultat från analogiundersökningar som kan användas till att bedöma förva-

rets långsiktiga säkerhet. Sådan information har hittills använts mera sporadiskt till säkerhetsanalyser som t ex KBS-3, SKB 91 och SSR-SFR, och de flesta av tillämpningarna avser förhållanden i närområdet, se Tabell 5.7-1 /5.7-1/.

Dessa och liknande exempel finns beskrivna i en bok som SKB medverkat till tillsammans med NAGRA och NIREX /5.7-2/. En mer detaljerad redogörelse för några utvalda tillämpningar av analogier inom säkerhetsanalysen har tagits fram i samarbete mellan TVO och SKB /5.7-3/.

SKB medverkar och har medverkat i flera internationella analogiprojekt och är också representerad i den internationella gruppen NAWG, National Analogue Working Group, som organiserats av EU i samarbete med US DOE. Den har som uppgift att diskutera resultaten av genomförda analogiundersökningar.

5.7.2 Cigar Lake

Cigar Lake-projektet har undersökt en mycket koncentrerad, djupt liggande och 1,3 miljarder år gammal uranförekomst i norra Saskatchewan, Kanada. Den har studerats av AECL som analog till ett djupförvar med använt bränsle sedan 1984. SKB gick med i projektet 1989. Detta samarbete är nu avslutat och avrapporterat /5.7-4/. Speciellt inom tre områden ger Cigar Lake resultaten ett starkt stöd åt djupförvarskonceptet. Redoxförhållandena i det djupa grundvattnet har hållit ner lösligheten för uran och förhindrat dess spridning, den låga hydrauliska konduktiviteten hos leran i och omkring malmen har bromsat frigörelsen av lätttrörliga nuklider och radiolysen har haft en måttlig inverkan trots den långa exponeringen. Redoxförhållandena kan beskrivas med gängse geokemiska modeller och frigörelsen ur närområdet (av lätttrörliga ämnen)

Tabell 5.7-1. Processer och analogier studerade inom SKBs program /5.7-1/.

Processer i närområdet	Naturliga analogier	Säkerhetsanalys
Kapselkorrosion	7	KBS-3
Bentonitstabilitet	8 (3,4,6)	KBS-3
Betongpåverkan	6,11,12	
Bränslekorrosion	3,4,5,9	KBS-2, SKB-91
Radiolys	3,4	KBS-3, SKB-91
Bildning av redoxfront	1	
Radionuklidlöslighet	1,3,6	
Radionuklidmigration		
- kolloider	1,3,6 (4)	
- organiskt material	1,3,6 (4)	SFR
- mikrober	1,3,6(4)	
Processer i fjärrområdet		
Radionuklidlöslighet	1,3	
Radionuklidmigration		
- kolloider	1,3,5,6, (4)	SKB-91
- organiskt material	3 (4,5,6)	
- mikrober	3 (4)	
Radionuklidretention		
- absorption	1,2,13 (4,5)	
- medfällning	1,2,3,6 (4,5)	
- matrisdiffusion	3,5 (4,6)	SKB-91

- | | |
|---------------------|-----------------------------|
| 1. Poços de Caldas | 8. Bentonitförekomster |
| 2. Alligator Rivers | 9. Uranitprover |
| 3. Cigar Lake | 10. N Sverige (Borrkärnor) |
| 4. Oklo | 11. Porjus (gammal betong) |
| 5. Palmottu | 12. Uppsala (gammal betong) |
| 6. Maqarin | 13. Äspö (sprickfyllnad) |
| 7. Kopparföremål | |

har kunnat beskrivas med masstransportmodeller som används inom säkerhetsanalysen. Den modell som tagits fram för att behandla radiolysen av grundvatten i kontakt med malm bör även kunna tillämpas på scenariot använt bränsle i en skadad kapsel, se Figur 5.7-1.

5.7.3 Jordanien

Jordanienprojektet undersöker förhållandena i och omkring aktiva hyperalkaliska källor i Maqarin, se Figur 5.7-2 och fossila motsvarigheter i centrala Jordanien. Spontan bildade förbränningszoner har alstrat portlandit och kalciumsilikater som ger grundvattnet ett pH i storleken 12 - 13. En hel serie av typiska cementmineral har bildats till följd av vattnets reaktioner med mineral i området. Projektet startade 1990 med stöd av NAGRA, NIREX och Ontario Hydro. SKB deltar sedan 1991. Resultaten från första fasen har avrapporterats. En väsentlig del av andra fasen är att pröva (validera) kemiska modeller för att beräkna lösligheten av radionuklider. Det finns gott om mineral i

Maqarin och man kan se hur elementen Sn, Se, Ni, Pb, Ra, Th och U uppträder i vatten med högt pH /5.7-5/. Projektet är nu inne i sin tredje fas och stöds för närvarande av NAGRA, NIREX, HMIP (Her Majesty's Inspectorate of Pollution) och SKB. Den tredje fasen samordnas och administreras av SKB.

5.7.4 Oklo

Okloprojektet undersöker de fossila naturliga reaktorerna i Oklo, Okelobondo och Bangombé i Gabon, Afrika. Den första sk reaktorzonen upptäcktes 1972. Bland de naturliga analogierna är Oklo helt unik. I samband med gruvdrift (uranbrytning) och prospektering i Oklo och de omgivande områdena har man hittat inte mindre än 15 olika ställen med spår av kärnreaktioner d v s reaktorzoner. Det handlar om kärnklyvning av samma slag som i en reaktor med uranbränsle och det har skett en omfattande produktion av fissions- och aktiveringsprodukter. Detta inträffade för knappt 2 miljarder år sedan. De radioaktiva isotoperna har hunnit avklinga sedan dess och omvandlats till övervägande stabila produkter, men spåren av reaktionerna finns kvar liksom flera av de material som var inblandade. Genom att spåra dotterprodukterna kan man se om migration förekommit, t ex en förhöjd halt av U-235 utanför en zon indikerar att diffusion av plutonium förekommit i närområdet som består av lermineral.

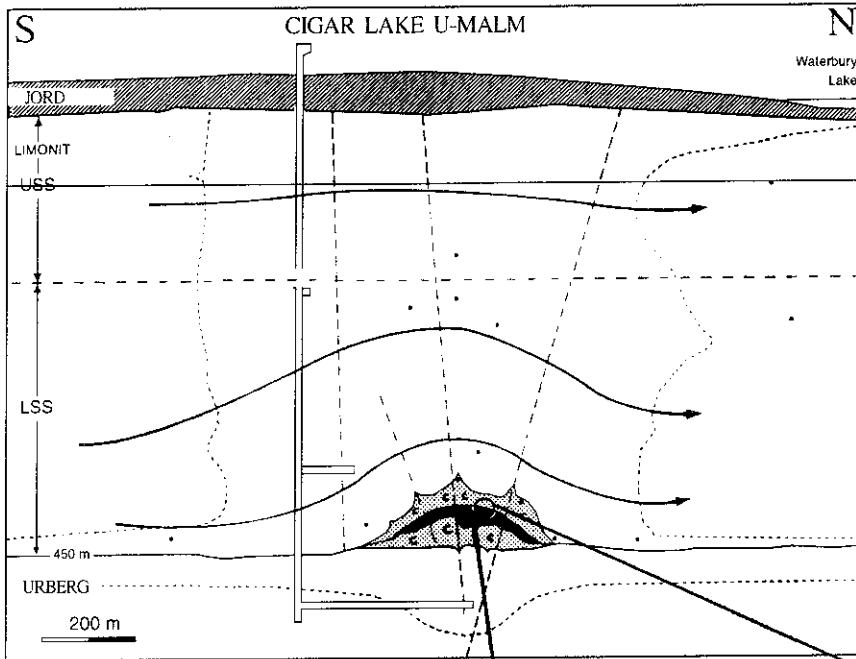
Projektet "Oklo, Natural Analogue for a Radioactive Waste Repository" har genomförts av CEA med ekonomiskt stöd från EU. SKB och flera andra organisationer från olika länder har kunnat delta. SKBs intresse har främst varit knutet till reaktorzonen i Bangombé, se Figur 5.7-3. Den är lämplig att undersöka, eftersom den ligger relativt nära markytan och långt från de övriga (ca 20 km), d v s ingen gruvbrytning har ännu skett i Bangombé. Okloprojektets första fas avrapporterats sommaren 1995.

5.7.5 Palmottu

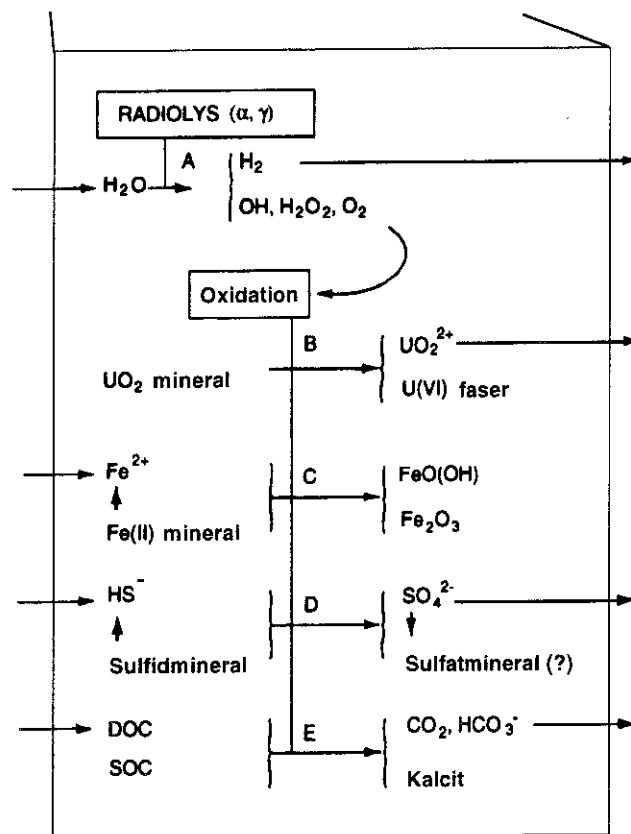
Vid sjön Palmottu i Finland finns en uranmineralisering. Den bildar en 1 - 15 m tjock brantstående zon som sträcker sig ca 300 m ner i berget. Den upptäcktes sent på 70-talet och undersöktes ingående, bl a borrades 62 prospekteringshål. Analogprojektet Palmottu startade 1988 och har bedrivits av GTK i Finland med stöd av STUK. Man har studerat uranförekomsten som en analogi till ett djupförvar för använt bränsle i granitiskt berg. En poäng i sammanhanget är att förhållandena i Palmottu är desamma, som man kan förvänta sig finna på de platser som väljs för djupförvaring i Finland och Sverige. SKB har deltagit i projektet som "aktiv observatör".

5.7.6 Övrigt

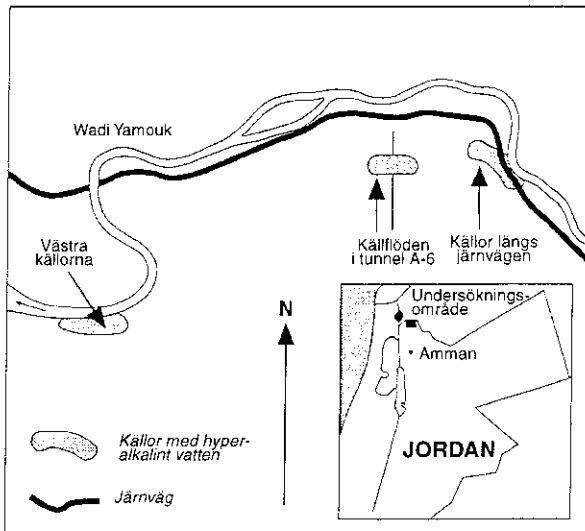
Gamla betongkonstruktioner av Portlandcement har provtagits för att undersöka hur cementpasta utvecklas med



Möjliga reaktioner på grund av radiolys



Figur 5.7-1. Vertikal profil genom uranmineraliseringen i Cigar Lake med grundvattenflödets riktning. Schematiskt visas de möjliga oxidationsreaktioner som kan orsakas av radiolys i malmen och den omgivande leran.



Figur 5.7-2. Maqarin i norra Jordanien. Platserna med de hyperalkaliska källorna är markerade.

tiden. I möjligaste mån har man försökt hitta prover som befunnit sig i en vattenmättad miljö. För prover i luft dominerar annars karbonatiseringen som sker genom inverkan av luftens kolsyra. Portlandcement kom först i början av seklet. Den är med andra ord inte särskilt gammal, men det är viktigt att i proven kunna upptäcka trender till förändringar och en del av observationerna kan förhoppningsvis bekräftas av resultaten från Jordanienprojektet som avser betydligt längre tider. Man vet nu mer om vilka mineralfaser som bildas i cement och deras egenskaper. Det bör därför gå att belysa utvecklingen på sikt,

förutsatt att geokemiska och hydrologiska förhållanden är givna. Undersökningarna av gamla betongprover är inte avslutade utan beräknas pågå ytterligare en tid.

5.7.7 Resultat i förhållande till mål i FUD-program 92

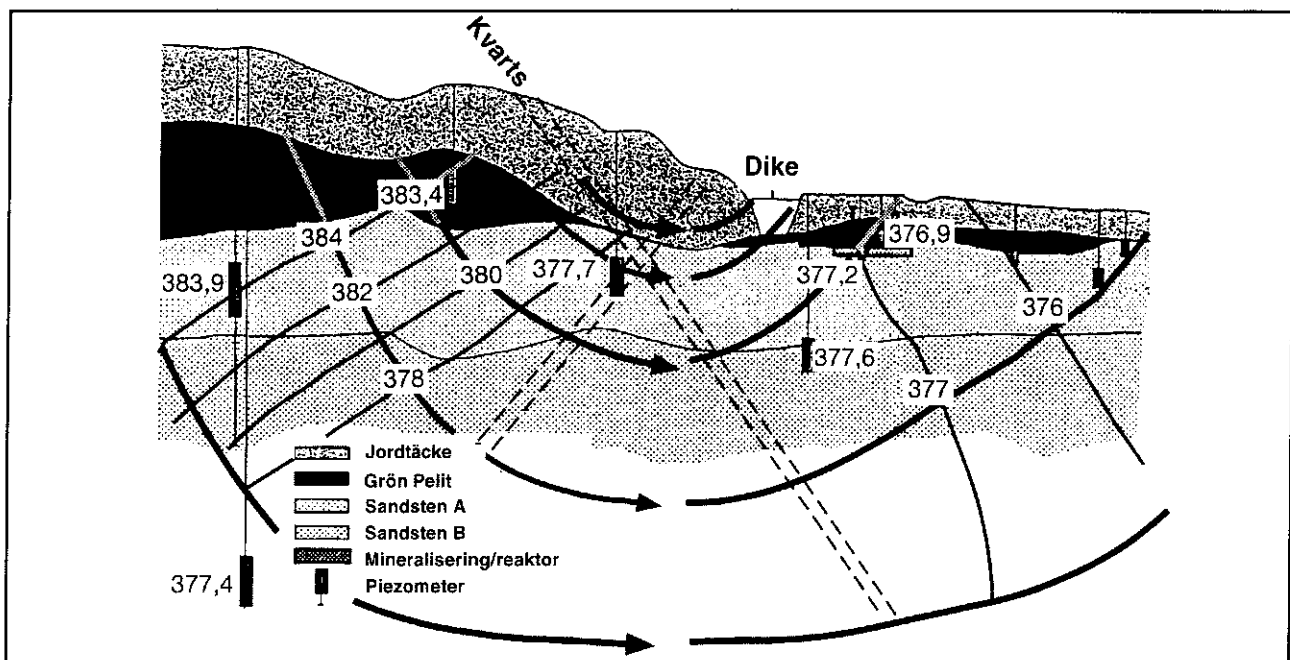
- Cigar Lake-projektet har avslutats och en egen utvärdering har genomförts. Den senare är helt klar men ännu inte avrapporterad.
- SKB har medverkat i fas I av Oklo-projektet. Vi har som planerats, ökat vårt engagemang i projektet och deltar nu som medsökande till EU-projektets fas II.
- Den tredje fasen av Jordanien-projektet har påbörjats och SKB har ansvaret för projektledningen.
- SKB har medverkat vid undersökningar i Palmottu.

5.8 BIOSFÄREN

5.8.1 Allmänt

För att kunna bedöma de radiologiska konsekvenserna av eventuella utsläpp av radioaktiva ämnen från ett slutförvar, behöver transporten från berget till människan (eller till annan biota) beskrivas. Det övergripande målet för SKBs studier av radioaktiva ämnens uppträdande i biosfären är att kunna genomföra trovärdiga konsekvensberäkningar i säkerhetsanalyserna.

Kunskapsläget för att modellera spridningen av radionuklider i biosfären är förhållandevis gott. I ett av Strålskyddsinstitutet initierat internationellt projekt benämnt



Figur 5.7-3. Bangombé. Mätningar av vattentryck. Hydraulisk gradient (—) och grundvattenflöde (---) är markerade i figuren.

BIOMOVS /5.8-1/ bedrivs ett samarbete som bl a har målen att

- granska hur de konceptuella modellerna överförts till beräkningsmodeller,
- jämföra olika spridningsmodeller,
- dokumentera metoderna för att definiera spridnings-scenarier.

Principiella frågetecknen i biosfärsmodellering som identifierats inom BIOMOVS och som är föremål för det fortsatta arbetet rör hanteringen dels av olika scenarier för biosfärens utveckling, dels av olika kritiska grupper. Dessa frågor är nära kopplade till formuleringen av strålskyddskraven.

Vad gäller scenariemetodiken har möjligheten att tillämpa RES-metodens inom biosfärsområdet prövats av en arbetsgrupp inom BIOMOVS /5.8-2/.

5.8.2 Databehov

Den dominerande osäkerheten i dagens biosfärsberäkningar förorsakas av tillgången och kvaliteten på data. Tidigare har, nästan uteslutande, generiska data använts. Motivet för detta har varit de stora förändringar som sker i biosfären inom relativt korta tidsperioder. För tider efter det att nästa Skandinaviska istid börjat är detta riktigt. Speciellt för de närmast följande 1000 åren kan dock platspecifika databaser och specifika bedömningar av inom vilka ramar biosfären på en given förläggningsplats kan förändra sig, bedömas ge underlag för en någorlunda meningsfull prognos.

Analyser av osäkerheterna i generiska beräkningar visar nämligen konfidensintervall på flera storleksordningar /5.8-3/. För modellering som syftar till att visa att dosgränser inte överskrids kan det vara acceptabelt även om redovisade konsekvenser är starkt överskattade. Om däremot modelleringen syftar till en bedömning av **förväntad** påverkan, som t ex vid jämförelser mellan förläggningsplatser eller vid optimering av strålskydd, är sådana resultat i regel meningslösa.

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. I säkerhetsanalysen förbises ofta den stora (några tiopotenser) utspädningsfaktor som produktion och distribution framkallar.

5.8.3 Modellutveckling

SKBs modelleringar av radionuklidspridning i biosfären har genomförts med BIOPATH, ett beräkningsprogram som utvecklats av Studsvik EcoSafe och som ingår i BIOMOVS-arbetet. BIOPATH har utnyttjas både för KBS-3, SFR och SKB 91 och har successivt vidareutvecklats med bl a insatser från SKB. För en detaljerad genom-

gång av hur biosfärsmodelleringen genomförs och hur den utnyttjas i säkerhetsanalyser hänvisas till SR 95 kapitel 8 och /5.1-3/.

Samtidigt med att biosfärens utveckling och valet av kritisk grupp i högre grad kommer att knytas till plats-specifika förhållanden förutses också en anpassning av BIOPATH-modellens uppbyggnad till de lokala förhållandena. Den vidareutveckling som planeras syftar till att förbättra det dataunderlag som spridningsmodellerna vilar på och att söka validera modellerna genom studier av analoga spridningsprocesser.

5.8.4 Resultat i förhållande till mål i FUD-program 92

Delmål i FUD-program 92 var:

- **Söka kvantifiera de osäkerheter som beror på att biosfären förändras**
Detta arbete har rapporterats i /5.8-2 och 3/. De stora olikheterna i doskonverteringsfaktorer vid utsläpp i Östersjön och inlandet är värda att noteras. Kvoten mellan dem är mer än två storleksordningar, med bättre förhållanden i Östersjön. Detta beror delvis på gynnsamma spridningsvägar och utspädningsförhållanden, delvis på långa uppehållstider i havssedimenten.
- **Förbättra dataunderlaget för spridningsmodeller**
Platsspecifika data har insamlats och utnyttjats i modellering /5.8-3 och 4/. Modeller för hur K_d -värden för jordar och sediment kan beräknas har utvecklats /5.8-5/.
- **Validera modeller genom studiet av analoga spridningsprocesser.**
Arbetet inom bl a BIOMOVS II ger ett bra underlag för att bedöma spridningsmodellernas validitet /5.8-6/, liksom studier av gränzytan mellan geosfär och biosfär /5.8-7/. Studier av naturliga analogier har påbörjats med en inventering /5.8-8/.

5.9 ANNAT AVFALL

Långlivat låg- och medelaktivt avfall skall, enligt planerna deponeras i en separat del av djupförvaret kallad SFL 3, 4 och 5. I SFL 3 deponeras långlivat avfall från Studsvik. Dit skall även sådant låg- och medelaktivt avfall komma som i och för sig skulle kunna gå till SFR, men som uppstår efter att SFR har stängts och förslutits. I SFL 4 deponeras rivningsavfall från CLAB och Inkapslingsanläggning och i SFL 5 hårdkomponenter. Till sin karaktär är avfallet i SFL 3-5 likt det som går till SFR. Det är främst det högre innehållet av långlivade nuklider, t ex plutoniumisotoper och nickel-59, som motiverar den djupare förläggningen i ett separat förvar.

Som grund för arbetet med långlivat avfall ligger de studier som utförts för säkerhetsanalyser för SFR. Erfarenheterna från det utredningsarbete som pågår och som beskrivs nedan kommer också att tillämpas i SFR.

5.9.1 Förstudie

En förstudie av funktionen hos barriärerna i SFL 3-5 /5.9-1/ har genomförts. Den påbörjades tidigt 1993 och avslutades sent 1994. Målet var att göra en första preliminär bedömning av närområdets barriärer mot spridning av radionuklider. Utgångspunkt var den konceptuella design av förvaret som presenterats i PLAN 93 (SKBs årliga planrapport /5.9-2/). Hydrogeologiska och andra platsrelaterade förutsättningar valdes med hjälp av förenklade antaganden och tidigare erfarenheter.

5.9.2 Inventering av avfallet

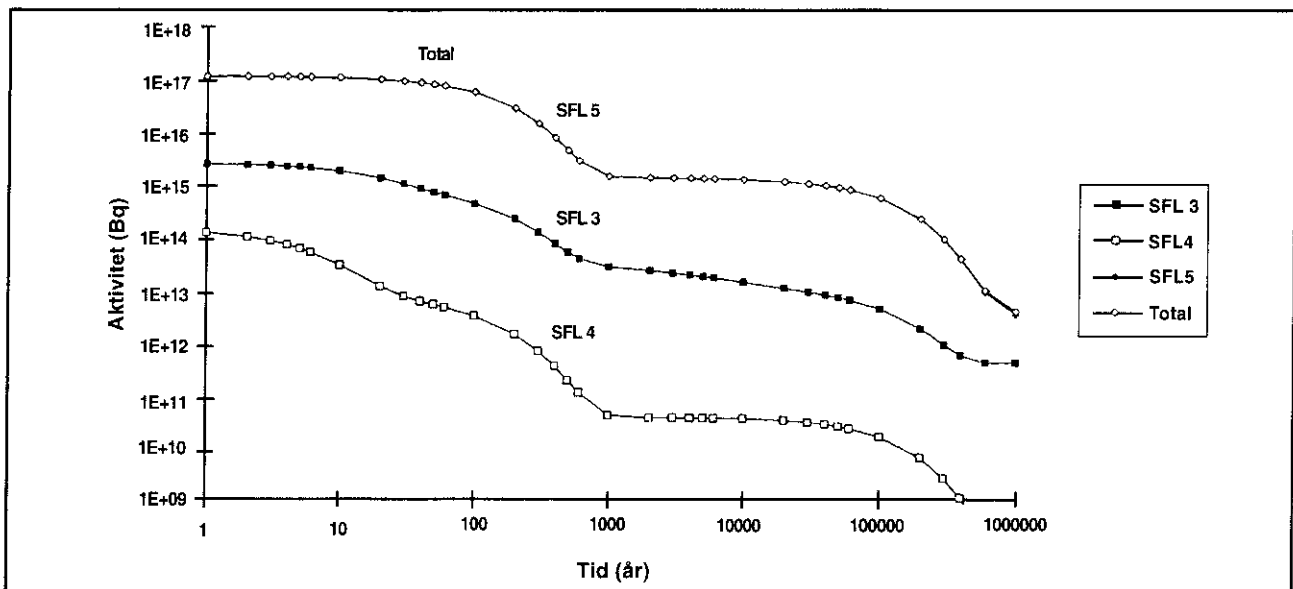
Inom ramen för förstudien har avfallet inventerats och karaktäriserats, se Figur 5.9-1 /5.9-3/. Mängden radionuklider av olika slag har uppskattats liksom en del andra komponenter av betydelse för säkerheten, t ex metaller, organiskt material, betong o s v. Den vanligaste metallen i avfallet är stål, främst rostfritt stål, som kommer att finnas i alla delarna av förvaret. Organiskt material är koncentrerat till SFL 3.

5.9.3 Laboratorieundersökningar

Laboratorieundersökningar har påbörjats med målet att ta fram erforderliga data och modeller för att analysera funktionen hos barriärerna. Arbetet är långsiktigt och främst inriktat på radionuklidernas kemi i förvaret (löslighet,

sorption, diffusion etc), inverkan av de organiska ämnena och betongens utveckling. Under 1995 pågår följande undersökningar inom programmet annat avfall:

- Sammanställning av kunskapsläget på området betongstabilitet under förhållanden som är relevanta för ett djupförvar.
- Lakning av krossad cementpasta med normalt respektive salt grundvatten. De joner som analyseras är: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , OH^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Al_{tot} och Si_{tot} . Den urlakade cementpastan undersöks efter urlakningen för att se vilka sekundära mineral som bildas.
- Löslighetsmätningar av Ni, Pu, Eu och Th i cementmiljö.
- Mätningar av radionuklidsorption på betong (K_d -värden). De element som undersöks är: Th, Eu, Cm, Pm, Co, Ra och Ni (fyr-, tre- och tvåvärda element).
- Mätningar av radionukliddiffusion i cementpasta och cementbruk. De element som undersöks är: Ni, Cs och tritium. Såväl diffusionsprofiler som genomdiffusion undersöks.
- Mätningar av radionukliddiffusion genom en blandning av 15% bentonit (Wyoming MX-80) och 85% sand. De element som studeras är: Cs, Tc och Ni. Man mäter även inverkan av cementporvatten på diffusionen.
- Studier av hur cellulosa (kristallin cellulosa, tekniska produkter som trä, papper, bomull, cementtillsatser etc), bryts ned vid höga pH (10-13,5) under anaeroba betingelser; identifiering av nedbrytningsprodukter, inklusive starka komplexbildare av typen polyhydroxykarboxylsyra (speciellt isosackarinsyra).
- Nedbrytning av isosackarinsyra vid höga pH (10-13,5); långtidsstabilitet.
- Komplexbildande förmåga hos isosackarinsyra, speciellt med tvåvärda element.



Figur 5.9-1. Innehåll av aktivitet (Bq) i de olika förvarsdelarna som en funktion av tiden (tiden från år 2040).

- Diffusion av isosackarinsyra genom cement.
- Inverkan av isosackarinsyra och nedbrytningsprodukter från cellulosa på absorptionen av radionuklider på cement. Experiment utförs med tre- och fyrvärda element samt nickel (tvåvärt).
- Inverkan av organiska komplexbildare på diffusion av radionuklider genom cement.

Liknande arbeten utförs i andra länder och SKB har därför inlett ett informellt samarbete med ANDRA, NAGRA och NIREX. Resultat och erfarenheter har tillämpats i förstudien /5.9-4/.

5.9.4 Funktionsanalys av barriärerna i närområdet

För att pröva barriärernas förmåga att hålla kvar och begränsa frigörelsen av radionuklider genomfördes transportberäkningar; enkla beräkningar med en tankreaktormodell för alla nuklider och beräkningar av advektion-diffusion i betong, bentonit och sand för speciellt utvalda nuklider. Även ett par giftiga metaller har tagits med i studien. Beräkningar och resultat finns redovisade i anslutning till förstudien /5.9-4/.

Förstudien har inneburit en första uppskattning och karaktärisering av det avfall som skall gå till SFL 3-5. Modern systematisk scenariemetodologi har testats /5.9-5/ och en första bedömning av barriärerna har genomförts. Resultaten visar att det metalliska avfallet från reaktorerna innehåller mest radionuklider. Detta avfall samlas i SFL 5. Vid bedömd tid för förslutning är aktiviteten i SFL 5 mer än tio gånger högre än i SFL 3 som i sin tur ligger mer än tio gånger över SFL 4. Den beräk-

nade frigörelsen av radionuklider är så låg att enbart närområdet skulle räcka som barriär. Resultaten tyder på att det utförande av förvaret som föreslagits är ändamålsenligt och ger stora marginaler. Flera scenarier återstår dock att analysera, t ex förändring av barriärerna på lång sikt, konsekvenser av gasbildning, istidsscenarioer, etc. Så här långt har förstudien tjänat sina syften; att uppskatta avfallsmängder och innehåll, pröva den konceptuella designen, inrikta de grundläggande undersökningarna på relevanta frågeställningar och förbereda kommande säkerhetsanalyser.

5.9.5 Resultat i förhållande till mål i FUD-program 92

Målen i FUD-program 92,

- att inventera och karaktärisera befintligt och förutsett avfall av denna typ,
- att bearbeta utformningen av djupförvaret för låg- och medelaktivt avfall, och
- att förbereda och ta fram underlag till erforderliga säkerhetsanalyser,

har bearbetats inom den avslutade förstudien och fortsätter i den nu pågående andra fasen. Denna syftar till att ha underlag framme till en säkerhetsanalys som kommer att vara en del av säkerhetsredovisningen inför ansökan om tillstånd för detaljundersökningar för djupförvaret. Laboratieförsök har påbörjats som planerats och ett aktivt samarbete med NAGRA, NIREX och ANDRA har gett en god vägledning ett värdefullt utbyte av information om kemiska förhållanden etc.

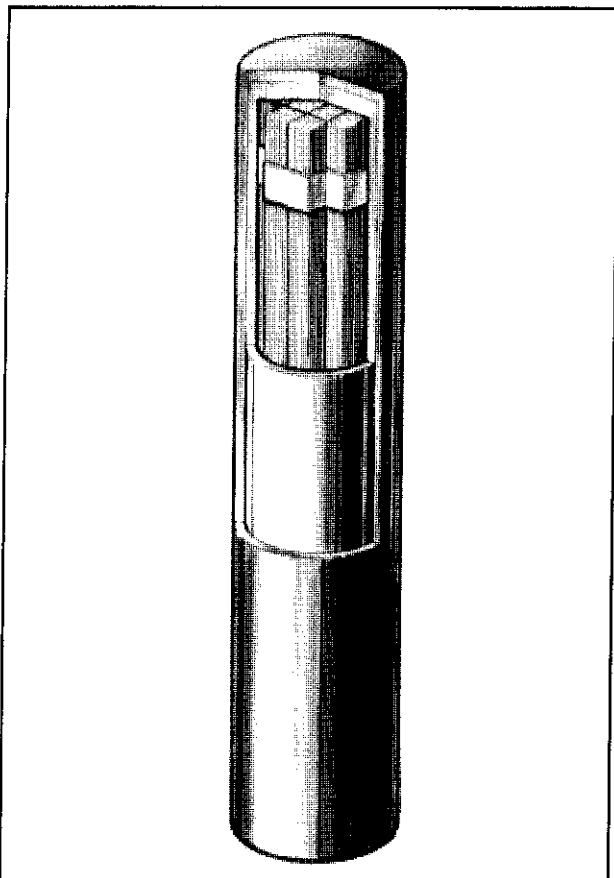
6 KUNSKAPSLÄGE – KAPSEL OCH INKAPSLING

6.1 FÖRUTSÄTTNINGAR

Innan det använda bränslet placeras i djupförvar skall det kapslas in i en beständig kapsel. Programmet för kapsel och inkapsling omfattar främst utveckling och tillverkning av kapsel samt projektering och byggande av en inkapslingsanläggning. Detta arbete benämns "Projekt inkapsling".

Kapslarna ska utformas och tillverkas så att de förblir täta under mycket lång tid i den miljö som kommer att råda i djupförvaret. De skall således inte korrodera sönder i det grundvatten som finns i berget eller brytas sönder av de mekaniska påfrestningar de utsätts för i djupförvaret.

För att åstadkomma detta föreslås kapseln bli utförd med en insats av t ex stål, som ger mekanisk hållfasthet,



Figur 6-1. Kopparkapsel med tryckbärande insats av stål.

och en yttre del av koppar, som ger korrosionsskydd, se Figur 6-1. Koppar korroderar mycket långsamt i det syrefria grundvatten som finns på djupet i svensk berggrund. Genomförda studier visar att kapseln troligen kommer att förbli tät under miljoner år framåt, vilket ger en betydande säkerhetsmarginal (som behövs m h t osäkerheter och variationer i förutsättningarna).

Tidigare har även andra utformningar av kapseln studerats, t ex en homogen kopparkapsel, där inneslutningen genomförs med het isostatisk pressning, eller en kopparkapsel, där tomrummet runt bränslet fyllts med bly. Båda dessa kräver dock att inkapslingen sker vid hög temperatur, vilket undviks med den nu planerade utformningen av kapseln. Kapselns insats har positioner där bränsleelementen placeras och locket försluts utan att någon större uppvärmning av bränslet sker. Denna "kalla process" begränsar riskerna i samband med inkapslingen, vilket varit avgörande för valet då den långsiktiga funktionen för de tre kapseltyperna är likvärdiga.

Inkapslingen planeras ske i en ny anläggning i anslutning till CLAB. I inkapslingsanläggningen tas bränslet emot ifrån CLABs lagringsbassänger. Efter att det kontrollerats och torkats placeras det i kapseln. Innan locket läggs på den inre stålbehållaren kommer luften i kapseln att ersättas med inert gas. Därefter försluts kopparkapseln genom att ett kopparlock svetsas på. Kraven på att denna svets blir tät och att tätheten kan kontrolleras är mycket höga. Förslutningen av locket planeras ske med elektronstrålesvetsning.

Vid utformningen av inkapslingsanläggningen kommer stor vikt att läggas vid strålskyddet för personalen och för omgivningen. Detta innebär bland annat att själva inkapslingen kommer att göras fjärrstyrt i kraftigt strålskärmat utrymme, s k högaktiva celler. Även en stor del av hanteringen av kapslar kommer att ske fjärrstyrt. Erfarenheterna från CLAB och SFR, men även från olika utländska anläggningar kommer att utnyttjas.

I ett senare skede skall även övrigt långlivat avfall behandlas i inkapslingsanläggningen. Exempel på sådant avfall är hårdkomponenter, t ex styrcylindrar, och andra interna delar från reaktortanken, vilka blivit aktiverade genom neutronbestrålning under reaktorernas drift. Dessa komponenter planeras bli ingjutna i betong. Vissa förberedelser för en senare komplettering med sådan utrustning görs vid projektering och byggande av inkapslingsanläggningen.

I inkapslingsprojektet ingår även utbyggnaden av lagringskapaciteten i CLAB. Med nuvarande bassänger beräknas CLAB bli fullt omkring år 2004, och ytterligare kapacitet behövs för att kunna ta hand om allt bränsle från de svenska kärnkraftverken. Denna del av projektet beskrivs inte i detta program.

I detta kapitel ges en lägesredovisning av inkapslingsprojektet och en översikt av kunskapsläget för kapsel och inkapsling. Kapitel 7 ger ett program för SKBs kommande arbeten på området.

6.2 UTVECKLING OCH UTFORMNING AV KAPSEL

6.2.1 Allmänt

Arbetet med utformningen av kapseln planeras ske i steg genom sammanställning av grundförutsättningar, egenskapskrav samt kriterier för dimensionering och utformning. Dessa sammanställningar kombinerat med erfarenheter från praktiska prov med kapseltillverkning och förslutning kommer sedan att ligga till grund för slutligt val av kapselutformning.

Grundförutsättningar, egenskapskrav och kriterier kommer bland annat att fastställas med hjälp av resultaten från analyser av såväl den långsiktiga säkerheten i djupförvaret som av säkerheten vid drift av inkapslingsanläggningen och transportsystemet. Utgångspunkterna för detta arbete har diskuterats i kapitel 4. I det följande ges en lägesrapport av detta arbete.

6.2.2 Funktions- och egenskapskrav

Säkerheten vid drift av inkapslingsanläggningen, transport och deponering av kapslar, samt den långsiktiga säkerheten för djupförvaret ställer krav på hur kapseln skall fungera. Kapslarna skall kunna tillverkas, fyllas, hanteras och förslutas på ett säkert sätt, samt förbli täta under lång tid efter deponering i djupförvaret.

Med utgångspunkt från dessa grundläggande förutsättningar kan kraven på kapselns egenskaper sammanfattas i tre delar; långtidssäkerhet och funktion i djupförvaret, tillverkning och hantering samt ekonomi och miljö.

Långtidssäkerhet och funktion i djupförvaret

Den grundläggande principen för säkerheten i djupförvaret är att isolera det använda bränslet. Denna isolering ska åstadkommas genom inneslutning i täta kapslar som deponeras i kristallin berggrund på en utvald plats. Detta ställer krav på att kapslarna är täta vid deponeringen och förblir täta under lång tid. Kapseln skall därför stå emot de mekaniska och kemiska påkänningar, som den kommer att utsättas för.

Säkerheten i djupförvaret bygger på flerbarriärprincipen. Detta innebär att säkerheten inte får bero av en ensam barriär. I händelse av kapselgenombrott skall de övriga barriärerna förhindra eller fördröja spridningen av radionuklider till acceptabla nivåer. Materialval och utformning av kapseln får då inte påverka funktionen av de övriga barriärerna på ett ogynnsamt sätt.

Kapseln ska således uppfylla två primära funktionskrav för att ge den erforderliga isoleringen i djupförvaret;

- a. Kapslarna ska vara **täta** under lång tid, vilket ställer krav på
 - initial täthet,
 - korrosionsbeständighet och
 - hållfasthet.
- b. Kapslarna ska **inte ge någon skadlig inverkan** på de andra barriärerna i djupförvaret, vilket ställer krav på
 - val av material som inte negativt påverkar buffert och berg,
 - begränsning av värme och stråldos i närområdet,
 - utformning så att bränslet förblir underkritiskt även om vatten kommer in i kapseln samt
 - begränsning av bottenstrycket mot bentoniten.

Driftsäkerhet, tillverkning och hantering

Säkerheten vid drift och underhållsarbeten vid inkapslingsanläggningen ska vara hög. Kapselns utformning ska svara mot de krav som ställs med hänsyn till normala och onormala driftfall i anläggningen. Den skall också klara hanteringsmissöden utan att personal och anläggning utsätts för oacceptabla exponeringar eller att de leder till oacceptabla utsläpp av radioaktiva ämnen.

Vid transport till djupförvaret placeras kapseln i en transportbehållare som utgör skydd mot omgivningspåverkan.

För arbetet med deponering i djupförvaret ska kapseln vara utformad så att den kan överföras från transportbehållaren till en deponeringsutrustning. Inplaceringen i deponeringshålen ska kunna genomföras med den precision och säkerhet som erfordras.

Vid ett eventuellt återtagande av kapslar efter den första deponeringsetappen ska kapslarna kunna lyftas och placeras i en transportbehållare.

De övergripande egenskapskraven m h t tillverkning och hantering är att kapseln ska utformas för att kunna

- tillverkas och kontrolleras i serieproduktion med upprätthållande av höga kvalitetskrav,
- hanteras, förslutas och kontrolleras i inkapslingsanläggningen,
- transporteras till djupförvaret,
- hanteras och deponeras i djupförvaret samt
- eventuellt återtagas ur deponeringshåll.

Ekonomi och miljö

Målen för säkerheten ska uppfyllas med iakttagande av en god resurshushållning och med beaktande av miljö-

konsekvenser för verksamheten i samband med tillverkning av kapslar och genomförande av själva inkapslingen.

Det valda kapselmaterialet ska inte ge någon skadlig inverkan på omgivningen.

6.2.3 Kriterier för dimensionering och utformning

Med ledning av ovanstående grundförutsättningar har kriterier för dimensionering och utformning av kapseln sammanställts. Kriterierna kan senare komma att justeras med hänsyn till förvarets slutliga utformning.

Täthet

Kravet på täthet kan uppdelas i initial täthet, korrosionsbeständighet samt hållfasthet och specificeras på följande sätt.

a. Initial täthet

Kapslarna ska tillverkas, förslutas och kontrolleras med metoder som garanterar att högst 0,1% av de färdiga kapslarna kan innehålla oupptäckta defekter som kan medföra initial otäthet eller som kan leda till tidigt kapselbrott.

b. Korrosionsbeständighet

Kapseln skall inte penetreras genom korrosion så att vatten kan tränga in i kapseln under de första 100 000 åren efter deponering. Som framgår i avsnitt 6.3.2 bedöms det maximala korrosionsdjupet efter 100 000 år vara ca 5 mm i typiskt svenskt grundvatten och med vald kapselutformning /6-1/. Med hänsyn till osäkerheter i underlaget med mera bör en lämplig säkerhetsfaktor ansättas vid bestämning av godstjockleken. För att inte korrosionshastigheten skall öka till följd av radiolys krävs dessutom en minsta totaltjocklek för kapselväggen.

c. Hållfasthet

Kapslarna ska dimensioneras för att klara deponering på 400-700 m djup vilket innebär jämt fördelad belastning av

- max.7 MPa hydrostatiskt tryck och
- ca 10 MPa tryck från bentonit och berg.

Dimensioneringen för dessa "normala" och jämt fördelade belastningar görs med iakttagande av sedvanliga säkerhetsmarginaler.

Kapslarna ska även kontrollberäknas för eventuell ojämn belastning (böjning) beroende på ojämn densitetsfördelning eller vattenupptagning i bentoniten och därmed ojämn uppbyggnad av svälltryck. Ojämn belastning (skjuvning) kan också tänkas förorsakas av berg rörelser.

Kapslarna kontrollberäknas även för ökat hydrostatiskt tryck (20-30 MPa) som kan uppstå vid en kommande istid.

Vid kontrollberäkningarna skall kapslarna visas klara föreskrivna påkänningar. Kravet på säkerhetsmarginaler kan dock vara lägre för dessa fall.

Materialförändringar som kan påverka hållfastheten i långtidsperspektivet beaktas vid utformningen. Mekanismer som skulle kunna ge sådana materialförändringar är:

- Inre korrosion (beroende på radiolys av eventuella kvarblivna luftmolekyler).
- Korntillväxt i kapselmaterialet.

Stråldosen kapseln får under 100 000 år är flera storleksordningar lägre än vad som krävs för att materialegenskaperna hos koppar och stål skall påverkas.

Påverkan på djupförvarets barriärer

Kapslarna ska utformas så att de inte ger en skadlig inverkan på övriga barriärens funktion i djupförvaret. Detta krav innebär att följande ska beaktas vid utformning och dimensionering av kapseln.

a. Val av material som inte påverkar buffert och berg

Kapselmaterialet och korrosionsprodukterna skall inte påtagligt försämra buffertens funktion. Kapselmaterialet eller kapselutformningen skall dessutom vara sådan att de efter ett eventuellt kapselgenombrott inte påtagligt försämrar funktionen av de övriga barriärerna. Detta kan bland annat tänkas ske genom oacceptabelt hög gasutveckling.

b. Begränsning av värmeöverföring till omgivande bentonit

Kapslarna skall utformas så att temperaturen i bentoniten närmast kapseln ej överstiger ca 90°C. Detta medför en begränsning av kapselns maximala yteffekt.

c. Begränsning av stråldos till bentoniten

Kapseln skall ge tillräckligt strålskydd så att bidraget till korrosionen av koppar från radiolysprodukter är litet jämfört med korrosionen från restsyre i systemet. Detta begränsar tillåten ytdosrat till ungefär 500 mGy/h /6-2, 3/.

d. Kapseln ska utformas så att bränslet förblir underkritiskt även vid ett vatteninbrott

Detta påverkar utformningen av kapselinsatsen och behovet av eventuellt fyllnadsmaterial.

e. Kapselns upplagstryck mot bentoniten begränsas så att kapseln ej sjunker ned genom bentoniten

Genomförda beräkningar visar att detta kan uppnås för de olika studerade kapselutformningarna.

Tillverkning och hantering

Bestämningen av konstruktionsförutsättningarna för tillverkning och hantering av kapslar kan delas upp på följande sätt

a. Tillverkning och kontroll av ofyllda kapslar

– Tillförlitliga metoder för tillverkning och kontroll av erforderlig kapselproduktion med bibehållen kvalitet ska tas fram. Beroende på metodval leder detta till att den planerade tillverkningskedjan analyseras med avseende på kvalitetskrav och erforderliga kontroller som t ex

- mikrostruktur i materialet,
- porositet och ytfinhet,
- hållfasthetsegenskaper samt
- kontroll av tillverkningssvetsar m m.

b. Transport till inkapslingsanläggningen och ankomstkontroll

- Kapsel med "emballage" ska tåla transport utan skador.
- Metoder för avsyning och kontroll för fastställande av kapselns status efter transport ska finnas.

c. Hantering av kapsel i inkapslingsanläggningen

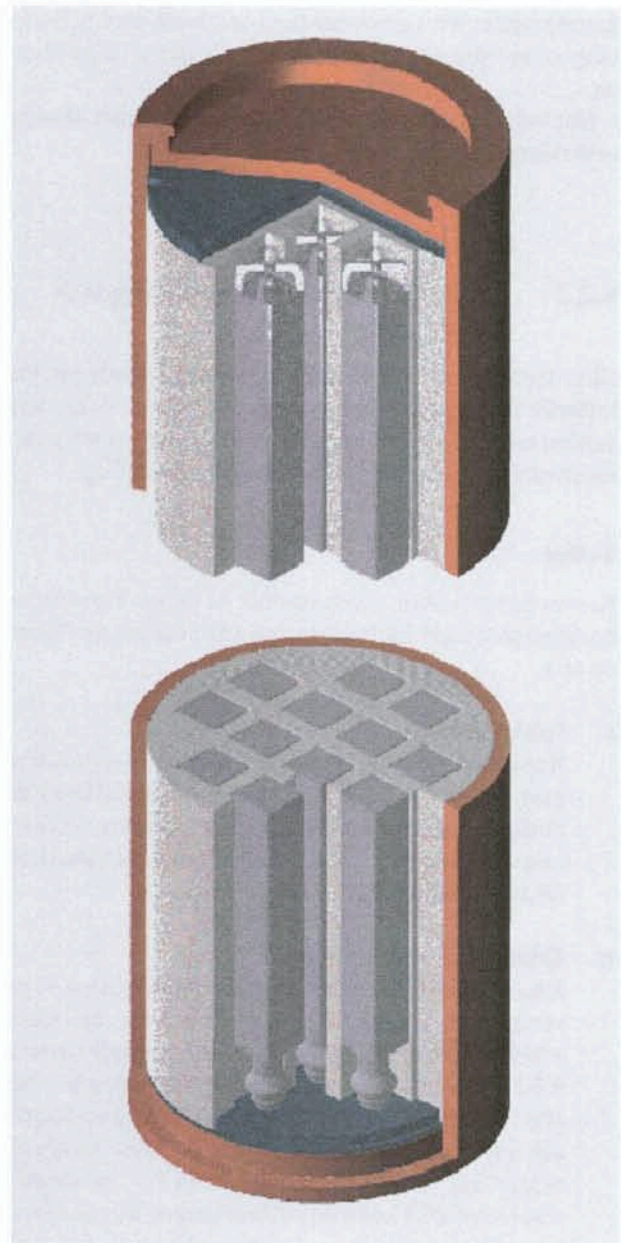
- Insatsen i kapseln ska vara utformad så att förekommande typer av bränsleelement kan inplaceras med anläggningens utrustning.
- Locket till insatsen ska utformas med hänsyn till inkapslingsprocessens krav på byte av atmosfär i kapseln och täthet vid förslutning av kopparlocket.
- Strålningen från kapseln behöver inte begränsas m h t hanteringen i inkapslingsanläggningen då kapseln för olika moment är försedd med extra strålskydd.
- Kapseln ska utformas för erforderliga lyft.
- Kapseln skall förses med en entydig identifikation.

d. Förslutning och efterbehandling

- Kopparlocket ska utformas så att det kan förslutas med elektronstråleteknik och så att kontroll av svetsen kan utföras.
- Svetsområdet ska utformas för att kunna uppfylla krav på ytfinhet efter maskinbearbetning.
- Kapseln ska utformas så att utsidan kan dekontamineras vid behov.

6.2.4 Referenskapsel

Arbetet med kapsel och inkapslingsprocess har inriktats på studier och utveckling av teknik som inte bidrar till uppvärmning av bränslet vid inkapslingen. En sådan teknik underlättar inkapslingsprocessen och minskar de radiologiska riskerna för driftpersonalen. Kapseln planeras uppbyggd av två delkomponenter; ett yttre korro-



Figur 6-2. Kopparkapsel med gjuten insats.

sionsskydd av koppar och en inre tryckbärande behållare av stål för att den ska uppfylla sin funktion i djupförvaret.

Utvecklingsarbetet för kapsel och inkapslingsprocess har resulterat i en något modifierad utformning av innerbehållaren. Tidigare planerades fyllning kring bränsleelementen med sand eller glaspärlor i en innerbehållare i form av en stålcylder. Detta innebar ett tekniskt komplicerat arbetsmoment. För att undvika detta har ett alternativ med gjuten innerbehållare till kopparkapseln studerats, se Figure 6-2. Denna behållare ersätter både stålcyldern som tryckupptagande komponent i kapseln och den insats som erfordrades för styrning av

elementen. Innerbehållaren är gjuten i ett stycke med hål för de olika typerna av bränsleelement. Den förutsättes gjutas i stål, järn eller eventuellt i något annat material. Denna utformning utgör referens för det fortsatta arbetet.

De exakta dimensionerna för kapseln och val av materialkvalitéer kommer att studeras i det fortsatta arbetet och väljas med utgångspunkt från ovan relaterade kriterier. Som bas för det fortsatta arbetet används tills vidare en kopparkapsel med 50 mm godstjocklek tillverkad av syrefri koppar med låg forsforhalt. Botten och lock är fogade till manteln med elektronstrålesvetsning. Kapselinsatsen är i gjutstål och med en minsta väggjocklek om 50 mm.

Flera alternativa utformningar av kopparkapseln har studerats och kommer att studeras ytterligare.

- Kopparkapsel med innerkomponent i gjutstål (referenskapsel).
- Kopparkapsel med en innerkomponent i form av ett stålcyliinder, som dimensioneras för det yttre övertrycket.
- Kopparkapsel med en innerkomponent i segjärn med samma utformning som referenskapseln.
- Kopparkapsel med en innerkomponent i gjutbrons med samma utformning som referenskapseln.

Referensalternativ är tills vidare en kapsel enligt ovan med innerkomponent i gjutstål. Provtillverkning av gjuten innerbehållare planeras inom den närmaste tiden.

Alternativet med inre stålcyliinder har utretts ingående och provtillverkning har genomförts, se avsnitt 6.4. Konstruktionens svaghet är att den stora tomvolymen inne i kapseln måste reduceras med ett fyllmaterial för att undvika risk för kriticitet om vatten skulle komma in i kapseln. Hantering och tillsats av fyllmaterial komplicerar hanteringen i inkapslingsanläggningen. Detta moment kan helt undvikas om en gjuten innerkomponent används.

Alternativet med gjuten innerkomponent i segjärn (SS 0717) är i alla väsentliga delar lika referensalternativet. Gjutbarheten är bättre för segjärn, men svetsbarheten lägre. Det senare behöver inte vara en nackdel, eftersom det finns goda förutsättningar att gjuta innerkomponenten i ett stycke, vilket skulle betydligt minska kraven på svetsbarhet.

En innerkomponent i brons skulle helt utesluta alla möjligheter till vätagasbildning i samband med korrosion, om det skulle bli genombrott på kopparhöljet. Detta bedöms underlätta funktionsbedömningen för en läckande kapsel men kapselkostnaden blir dock högre för ett sådant alternativ.

Bakgrund till val av kopparkapsel

Flera olika material har god korrosionsbeständighet i vatten. Detta kan bero på termodynamisk stabilitet hos materialet självt, hos ett ytskikt av skyddande korrosionsprodukter (passivering) eller på låg korrosions-

hastighet. Fullständig immunitet mot korrosion i grundvatten kan garanteras av ädelmetaller och keramer, till exempel aluminiumoxid och titandioxid. Ädelmetaller måste uteslutas av kostnadsskäl och keramiska kapslar är svåra att tillverka och försluta. Materialets sprödhet gör att de också är känsliga för hanteringsmissöden. Tidigare undersökningar har även visat på osäkerheter i bedömningen av risken för fördröjt brott i dessa material.

Kapslar av metaller, som korroderar i vatten (om än med låg korrosionshastighet) kommer att ha en begränsad livstid, som bestäms av tjockleken på kapseln. Kapslar av passiva material kommer att för sin livslängd bli beroende av att passivskiktet är stabilt och oskadat över långa tider. Koppar är immun mot korrosion i syrefritt vatten och livslängden på en kopparkapsel kommer att bestämmas av mängden lösta korrosiva ämnen, främst sulfider, i grundvattnet som transporteras till kapselytan (och av formen på korrosionsangreppet).

Vatten på stort djup i svensk berggrund är syrefritt och innehåller mycket små mängder sulfid. En kopparkapsel kommer därför att kunna få en mycket lång livslängd i förvaringsmiljön.

Koppars och kopparsulfids låga löslighet i vatten gör att kapseln kommer att ha en obetydlig påverkan på bufferten även under mycket långa tider.

6.2.5 Kapselstorlek

Kapselns storlek kommer att bestämmas dels med hänsyn till hanterings, transport- och deponeringssystemets begränsningar, dels med hänsyn till att temperaturen på kapselytan i djupförvaret ej skall överskrida 90°C. Den senare faktorn medför vissa frihetsgrader i balanseringen mellan kapselstorlek, bränsleeffekt (som beror av utbränning och avklingningstid) och utformningen av djupförvaret (främst avståndet mellan kapslarna). I PASS-studien /6-4/ gjordes vissa variationsberäkningar för kapselstorleken, varefter en referenskapsel för upp till 12 BWR-element eller 4 PWR-element valdes. Fortsatta studier pågår för att fastlägga lämplig kapselstorlek. I dessa ingår bland annat analyser av hur känslig temperaturen är för variationer i värmeledningsförmåga för bentonit och berg, bergtemperatur, förvarsutformning och deponeringstidplan.

6.2.6 Kriticetsfrågor

Kapseln skall utformas så att det inte föreligger risk för kriticitet vid hantering av kapseln med bränsle i inkapslingsanläggningen eller på lång sikt i slutförvaret om vatten tränger in i kapseln. Referenskapseln rymmer 12 BWR-bränsleelement eller 4 PWR-bränsle. Med de anrikningar som används idag kan en kritisk konfiguration åstadkommas för dessa om bränslets utbränning är tillräckligt låg. För att undvika risken för kriticitet kan olika metoder användas /6-5/:

- Endast bränsle med en garanterad minsta utbränning placeras i kapseln.
- Tomrummet mellan bränsleelementen fylls med material som minskar den tillgängliga vattenmoderatorn.
- Neutronabsorberande material används i kapsel och fyllnadsmaterial.

Preliminära beräkningar har utförts av reaktiviteten i kapseln för olika bränsle och fyllnadskonfigurationer /6-6/. Beräkningar för en kapsel utan insats visar att för bränsle med högsta anrikning godkänd för CLAB

- krävs en minsta utbränning som ligger nära den som normalt uppnås (utbränningskreditering), eller
- noggrann fyllning med partikulärt material kring bränsleelementen.

Med hänsyn till den långsiktiga kriticitetssäkerheten måste man i det senare fallet visa att materialet inte kompakteras eller löses upp med tiden. Dessutom måste det visas att reaktiviteten inte ökar i oacceptabel grad på grund av ändringar i isotopsammansättning i det mycket långa tidsperspektivet.

Som alternativ till fyllning med partiklar kan kapselns insats från början utformas med separata kanaler för bränsleelementen. Härigenom minskas mängden vatten kring bränslet i en skadad kapsel. De preliminära beräkningar som genomförts för denna konstruktion /6-7/ visar att en mindre utbränningskreditering kan krävas för modernt PWR-bränsle medan detta troligen ej behövs för BWR-bränsle.

Ifall utbränningskreditering tillgrips föreligger behov att mäta bränslets utbränning. Olika metoder för detta har sammanställts /6-8/. Liknande behov kan även föreligga av safeguardsskäl.

Frågan om kriticitet utanför kapseln i djupförvaret har aktualiserats genom studier i Los Alamos /6-9/. SKB har tidigare genomfört liknande studier /6-10/. Resultaten av dessa visar att det krävs mycket osannolika processer, för att lösa upp bränslet och sedan få det att falla ut i en konfiguration som kan leda till kriticitet /6-11/.

6.3 MATERIALFRÅGOR

Kravet på kopparkapseln är att den skall förbli tät under lång tid, samt kunna tillverkas och förslutas på ett reproducerbart och kontrollerbart sätt. De viktiga egenskaperna ur långtidssynpunkt hos kopparmaterialet är dess korrosionsegenskaper och dess krypegenskaper. För kontroll av den förslutna kapseln har även materialets kornstorlek betydelse, och för svetsbarheten har föroreningar/legeringsämnen betydelse.

Kravet på den kapselinsatsen är i första hand att den skall ge tillräcklig mekanisk hållfasthet åt kapseln.

6.3.1 Undersökta material

Kopparkapseln

Huvudinriktningen har varit att välja ett så rent kopparmaterial som möjligt. Detta val har styrts av kraven på korrosionsbeständighet. Ren syrefri koppar har dock visat sig ha nedsatt krypduktilitet vid förhöjda temperaturer. Genom tillsats av 40 till 60 ppm fosfor kan detta fenomen undvikas. Fosfortillsatsen ledde också till en ökning av rekristallisationstemperaturen från 140°C till 250°C. Höjningen av rekristallisationstemperaturen medför att kornstorleken begränsas. Vid fosforhalter i detta område har ingen ökad känslighet för spänningsskorrosion kunnat observerats /6-12, 13/.

Som referensmaterial för tester av tillverkning och förslutning av kopparkapseln används tills vidare en ren koppar med följande gränser och nivåer på tillsatser och oönskade föroreningar :

P: 40-60 ppm, O: <10 ppm, S: <6 ppm, H: <2 ppm

Önskad största kornstorlek är på materialet är ca 250 µm.

Alternativa kopparlegeringar har diskuterats, till exempel CuCr, CuZr och CuSn. Krom och zirkon ger en mycket stor höjning av rekristallisationstemperaturen, kanske 400°C, men är mycket reaktiva i en kopparsmälta och det är därför svårt att hålla noggrann kontroll på tillsatta mängder. Användningen av dessa legeringar skulle väsentligt försvåra tillverkningen av kopparkapslar. Tenn är ett legeringsämne, som ofta används i koppar. Halter i området 0,1-0,2% ger en höjning av rekristallisationstemperaturen med 175-200°C och skulle kunna vara ett alternativ till fosfor. Förutsättningar för att använda alternativa legeringar kommer att utredas ytterligare.

Inre behållaren

Tillräcklig tryckhållfasthet och duktilitet kan uppnås med flera olika material, som också har tillräcklig seghet för att stå emot hanteringsmissöden. Låglegerade tryckkärnsstål ger fullt tillräcklig hållfasthet för en självbärande konstruktion (stålrör). Vid gjuten insats med inre stöd kan olika typer av gjutgods ge godtagbara egenskaper, t ex gjutstål (SS 1306), gjutjärn (t ex SS 0717) eller brons. Valet av material kommer att baseras bland annat på kommande tillverkningsprov.

6.3.2 Resultat av materialundersökningar

Materialundersökningar har endast genomförts för kopparmaterialet. För stålkomponenten finns tillräcklig information tillgänglig i litteraturen.

Korrosion

Allmänt

Korrosionsegenskaperna hos koppar är väl utredda. En sammanfattande bedömning av kunskapsläget beträffande kopparkorrosion ges i /6-14/. Slutsatserna är att det är mycket osannolikt att allmän eller lokal korrosion skall vara begränsande för kapselns livslängd i djupförvaret. Områden som identifierades för ytterligare utredning är främst spänningskorrosion.

Under perioden har ny information kommit fram, som tyder på att även förutsättningarna för bakteriell korrosion bör utredas ytterligare. Dessutom har i remissgranskningen av FUD 92 möjligheten till lokal sulfidkorrosion genom bildning av sulfid "whiskers" diskuterats /6-15/.

Vattenkemi

Kapselns utsida ska vara beständig mot korrosion så att vatten inte tränger in i kapseln under angiven tidsperiod i den aktuella miljön. Korrosionsangreppen kan vara av allmän eller lokal karaktär och styrs, vad det gäller yttre korrosionsangrepp, av den kemiska miljön i kapselns omedelbara närområde, d v s sammansättningen på bentonitporvattnet. Den i sin tur styrs av växelverkan mellan bentoniten och grundvattnet i det omgivande berget. Preliminära förutsättningar har använts för beskrivning av den vattenkemiska miljön under olika perioder i djupförvaret. Tabell 6.2-1 visar typiska värden för karbonathaltigt grundvatten med låg kloridhalt jämviktat med bentonit.

Tabell 6.2-1. Typiska värden (mmol/dm³) för karbonathaltigt grundvatten med låg kloridhalt jämviktat med bentonit.

Na ⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻ /CO ₃ ²⁻	pH
90	9,2	1,8	33	3	9,3

Kloridhalten i grundvattnet varierar inom mycket vida ramar och sträcker sig från ca 0,15 mmol/dm³ till ca 1,5 mol/dm³. Kloridhalten påverkas inte av bentoniten, vilket leder till att motsvarande värden även erhålls i bentonitporvattnet. Dominerande kationer är Na och Ca som således också varierar med kloridhalten. För övriga dominerande anjoner ligger variationsområdet i grundvatten inom bentonitporvattnets område, som kommer att styra halterna av dessa joner för överskådlig tid.

Praktiskt taget alla undersökta grundvatten har visat sig vara reducerande. Ett typiskt Eh-värde är -300 mV. Detta gäller ostörda förhållanden. Efter förslutning av djupförvaret kommer det att finnas $3 \cdot 10^{-4}$ mol/dm³ löst restsyre i grundvattnet. Sulfidhalten förutses vara $3 \cdot 10^{-5}$ mol/dm³.

Slutsatser beträffande korrosionsbeständigheten bedöms inte påverkas i någon större utsträckning av de

lokala variationer som kan accepteras för valet av förlägningsplats.

Former av korrosion

Vid bedömningen av korrosion i förvaret måste man beakta:

- Yttre korrosion i grundvatten under oxiderande förhållanden så länge initialsyre finns kvar i anslutning till kapseln.
- Yttre korrosion i grundvatten under reducerande förhållanden.
- Yttre korrosion till följd av radiolysprodukter.
- Yttre korrosion orsakad av mikrobiell aktivitet.
- Spänningskorrosion.
- Inre korrosion på grund av restsyre, restvatten och radiolysprodukter i kapseln.
- Inre spänningskorrosion.

Yttre korrosion: oxiderande/reducerande förhållanden

För koppar har korrosionsförlopp som kan leda till otät kapsel studerats och beräkning av erforderlig godstjocklek har gjorts för respektive fall. Beräkningarna har baserats på konservativa antaganden. Med hänsyn till osäkerheter i underlaget och risk för ej kända lokala variationer i förhållandena bör godstjockleken dock väljas med hänsyn till det största djup på korrosionsskada som erhållits i dessa beräkningsfall med tillägg av en säkerhetsfaktor.

Modellering av korrosionsförlopp i koppar visar på följande frättdjup efter 100 000 för ett troligt fall och ett konservativt fall /6-1/:

	Troligt fall	Konservativt fall
- Allmän korrosion		
I närvaro av syre	0,5 µm	5 µm
Syrefria förhållanden	5 µm	0,4 mm
- Gropfrätning		
I närvaro av syre	250 µm	2,5 mm
Syrefria förhållanden	10 µm	2 mm
- Maximalt korrosionsdjup	~270 µm	~5 mm

Syre beräknas finnas i djupförvaret från driftperioden upp till högst några hundra år /6-16/. Detta syre förbrukas genom reaktioner med koppar eller mineral i närområdet. Därefter är förvaret syrefritt.

Korrosion genom bildning av sulfid "whiskers" har utretts dels genom litteraturstudier och dels genom försök att modellera eventuell "whisker"-bildning /6-29, 30/. Det finns inga belägg i litteraturen för att korrosion av den här typen skulle äga rum i vatten. Möjligen bör förutsättningarna för kärnbildning och tillväxt från ytke-misk utgångspunkt utredas ytterligare.

Korrosion till följd av radiolysprodukter

Radiolysberäkningar /6-2/ visar att vid de kapseltjocklekarna, som är aktuella kommer bidraget till korrosionen från radiolytiskt producerade oxidanter att vara försumbart.

Mikrobiell korrosion

Sedan FUD-program 92 har den tidigare ansatsen i KBS-3 att bedöma bakteriell korrosion ifrågasatts. I KBS-3 ansågs tillgången på organiskt material i närområdet begränsa tillväxten av bakterier. Detta är kanske inte fallet. Pågående undersökningar av tillväxten av sulfatreducerande bakterier i kompakterad bentonit visar att för densiteter över 1500 kg/m³, kan inte bakterierna överleva (se avsnitt 5.6.2). Mikrobiell korrosion skulle därmed inte kunna påverka kapselns livslängd på något avgörande sätt.

Spänningskorrosion

För att erhålla en koppar med god beständighet mot spänningskorrosion föreslogs ursprungligen en högren syrefri koppar-kvalitet, eftersom risken då bedömdes som obefintlig /6-17/. Senare resultat har visat att så inte är fallet, men att det är osannolikt med spänningskorrosionssprickning under förvarförhållanden /6-3/. Detta har även bekräftats av senare undersökningar, som visar att benägenheten för spänningskorrosion i förvarsmiljö är ringa /6-13/.

Inre korrosion av restsyre/restvatten

Mängderna inneslutet vatten och restsyre är små och kommer endast att leda till obetydliga korrosionsangrepp på stålbehållaren om de sker i form av allmän korrosion eller gropfrätning.

Inre spänningskorrosion

Undersökningar av känsligheten för spänningskorrosion på stål kapseln orsakade av radiolysprodukter visar att spänningskorrosion inte kan uteslutas om restlufthalten överskrider 10 vpm /6-18/. Eftersom kapseln befinner sig under yttre övertryck är konsekvenserna av spänningskorrosionssprickning begränsade och behöver inte leda till påtagligt nedsatt hållfasthet för stålbehållaren.

Korrosion av stål kapseln efter kapselgenombrott

Konsekvenserna av korrosion på de inre ståldetaljerna efter genombrott av kapselns yttre kopparhölje har utretts under de senaste åren. Detta gäller särskilt korrosionshastighet/mekanism, tryckuppbyggnad orsakad av tillväxten av korrosionsprodukter, galvaniska effekter, bildning av HNO₃ inuti kapseln p g a radiolys, samt konsekvenserna av vätgasproduktion i förvaret. Både experimentella arbeten och modellering har genomförts. Resultaten från dessa studier finns i /6-19, 20, 21, 22, 23, 24, 25/. Konsekvenserna av vätgasproduktionen för bentoniten diskuteras i 5.4.5.

De huvudsakliga slutsatserna från studierna är:

- Experiment visar att korrosionshastigheten antar ett värde på 0,1-1 µm/år efter en tid av 1 000 - 2 000 timmar, vilket motsvarar en vätgasproduktion av ca 1,6 m³/år (NTP). Korrosionshastigheten är beroende av pH och jonstyrka, lägre pH och högre jonstyrka ökar hastigheten, men den hamnar alltid inom intervallet. Korrosionstakten är i princip oberoende av andra faktorer, t ex visar prover i en fuktig anaerob atmosfär samma korrosionshastighet som prover nedsänkta i vatten.
- Korrosionshastighetens värde beror på att en skyddande film av magnetit bildas på stålet. Denna film fungerar som en äkta passiv film, d v s dess låga löslighet/reaktivitet förhindrar vatten att komma i kontakt med stålet och kväver därför den anodiska upplösningen. Magnetitfilmen består av två lager. Ett hårt elektrokemiskt bildat inre lager och ett utfällt yttre lager. Det huvudsakliga skyddet kommer från det inre lagret, vilket är svårt att avlägsna. Mekaniska skador på magnetitskiktet kommer därför inte att påverka stålets korrosionshastighet.
- Beräkningar visar att vid en defekt i kopparhöljet kommer korrosion att ske över en stor andel av stålets yta. De bildade korrosionsprodukterna kommer därför inte att skapa sådana spänningar i koppar kapseln att defekten i kopparn kommer att vidgas.
- För en kapsel innehållande 0,01% luft initialt kommer ca 0,02 g salpetersyra att bildas från radiolys av vatten och luft. Den använda modellen innehåller dock en del osäkerheter för systemet luft/inert gas/vatten blandningar.
- Galvanisk koppling mellan den yttre koppar- och den inre stål kapseln kan bara förekomma om det finns en kontinuerlig lösning mellan metallerna. Denna kan endast uppkomma om det finns en defekt i kopparhöljet och vatten tränger in i spalten mellan kapslarna.

Vid aeroba förhållanden skulle en betydande galvanisk korrosion av stålet kunna pågå. En kombination av den låga transporthastigheten för syre genom bentoniten och lerans låga elektriska ledningsförmåga förhindrar dock någon signifikant galvanisk korrosion under förvarets syresatta period.

Under anaeroba förhållanden kan kopplingen kopparstål öka korrosionshastigheten i proportion till den ökade arean, eftersom kopparn fungerar som om den vore en bit icke-korroderande stål. Detta kan ge en ökad korrosionshastighet med en faktor <2. Experiment visar dock att den tidigare nämnda magnetitfilmen är reaktionsstyrande, d v s galvaniska effekter kommer inte att påverka stålets korrosionshastighet.

Kunskapsläget på stålkorrosion är idag bra och inga ytterligare studier planeras.

Gjutjärn är idag ett alternativt material för den inre kapseln. Det är inte säkert att de slutsatser som gäller för stål också gäller för gjutjärn. Gjutjärns korrosionsegenskaper kommer därför att utredas.

Krypduktilitet

Referenskonstruktionen har av tillverkningskäl ett radiellt spel mellan kapsel och insats på ca 2 mm. I djupförvaret utsätts kapseln för ett yttre likformigt övertryck på 14 till 17 MPa. Belastningen gör att kopparkapseln deformeras och trycks mot insatsen. För att kontrollera koppars krypduktilitet har en serie krypprov gjorts. Resultaten från dessa försök visade att ren syrefri koppar hade dålig krypduktilitet vid provning i temperaturintervallet 200-250°C (Den förväntade temperaturen i förvaret är mindre än 90°C). Orsaken antogs vara utskiljningar av svavel. Svavel har mycket låg löslighet i koppar och har genom att det lägger sig i korngränser en menlig inverkan på krypduktiliteten. För att lösa problemet provades en ny kvalitet med bättre krypegenskaper, Cu-OFP med reducerad svavelhalt (<6 ppm) och tillsats av ca 50 ppm fosfor. Fosfortillsatsen bidrog till betydligt förbättrad krypduktilitet, men mekanismen bakom detta är ännu inte helt klarlagd. Resultaten från materialprovningarna finns sammanfattade i /6-26/.

Med kapselns nuvarande utformning, som har ett spel på 2 mm radiellt mellan kopparhölje och stålinsats, är kraven på duktilitet begränsade. Maximala töjningarna i koppargodset är beräknade till under 4%.

Kornstorlek

Kornstorleken i materialet har viss inverkan på krypduktiliteten genom att olöst svavel vid minskande kornstorlek fördelas på en större korngränsoarea med lägre ytkoncentrationer som följd. Kornstorleken har även betydelse för vilken krypmekanism som är dominerande /6-27/.

Kornstorleken i materialet och kornens form påverkar även upplösningen vid ultraljudsundersökningar. Ultraljudssignalen sprids och dämpas om korn är stora eller oregelbundna. Den grova struktur som finns i göten måste följaktligen brytas ned vid valsning eller extrudering för att ge goda möjligheter till inspektion med ultraljud. Kraven på kornstorlek hänger därvid samman med vilka krav som ställs på hur små defekter som skall kunna detekteras, se avsnitt 6.5.3. Målsättningen vid demonstrationstillverkningen har varit att erhålla en kornstorlek på maximalt ca 250 µm. Detta har bedömts ge fullt tillräckliga möjligheter för ultraljudsprovning av grundmaterialet och av svetsar.

En finkornig koppar reducerar kapselns känslighet för korngränsskorrosion. Korngränsoarean ökar och därmed krävs motsvarande större angrepp för genombrott ska kunna ske. Eftersom det kan finnas risk att kornstrukturen kan förgrovas under tiden i djupförvaret har undersökningar inletts beträffande kornstillväxt.

Genom den föreslagna fosfortillsatsen (ca 50 ppm) ökar rekristallisationstemperaturen för koppar (temperaturen för 50% mjukning) från 140°C till 250°C. Detta leder till att kornstorleken begränsas. Motsvarande eller större höjning av rekristallisationstemperaturen kan åstadkommas med tillsatser av krom, zirkon eller tenn. Krom och zirkon är svåra att tillsätta med noggrann kontroll till en kopparsmälta och skulle därför försvåra tillverkningen väsentligt. Tillsatser av tenn på 0,1 till 0,2% ger en ökning av rekristallisationstemperaturen med 170-200°C.

Svetsbarhet

Både ren syrefri koppar och syrefri koppar med 50 ppm fosfor har mycket god svetsbarhet med elektronstråle. Förhöjda halter syre och fosfor har visat sig påverka svetsningen framför allt genom att leda till ökad porositet.

6.3.3 Sammanfattning

Valet av material i kopparkapseln bestäms av krav på korrosionsbeständighet, duktilitet, svetsbarhet och möjlighet att tillverka med lämplig kornstorlek. Som referensmaterial används till vidare en syrefri koppar med cirka 50 ppm fosfor. Korrosionsegenskaperna för detta material är väl kända. Benägenheten för spänningskorrosion är ringa. För den inre behållaren finns flera möjliga material tillgängliga. Valet kommer delvis att bestämmas av tillverkningsmetod.

Verksamheten i förhållande till mål i FUD 92

I FUD 92 uppställdes att antal mål för FoU-arbetet om kapselmateriäl inför perioden 1993-1998. Här följer en kort lägesredovisning i relation till målen:

Fullfölja studierna inom korrosionsområdet rörande:

- Utreda förutsättningarna för spänningskorrosion på koppar. – Arbetet har påbörjats och en lägesrapport har tagits fram /6-13/.
- Utreda korrosion och radiolytiskt inducerad korrosion på kapselns insida. – Rapporter har om väteproducerande korrosion av stålinsatsen /6-23, 24, 25/ och risken för spänningskorrosion på grund av radiolys /6-18/ har tagits fram under perioden.
- Utreda lokal korrosion i milt oxiderande miljö. – Rapporter om utvecklingen av redoxpotentialen i närområdet /6-16/ och växelverkan mellan bentonit och koppar /6-1/ har tagits fram. En första matematisk modell för modellering av gropfrätning på koppar under oxiderande förhållanden /6-28/ har tagits fram.

6.4 KAPSELTILLVERKNING

Referenskapseln kan framställas med flera olika metoder. För kopparkapseln har identifierats:

- Extrudering av rör.
- Pressning/valsning.
- Het Isostatisk Pressning, HIP.
- Elektrodeponering.
- Spray forming.

Under de senaste åren har provtillverkning skett med de två första metoderna som finns kommersiellt tillgängliga i full storlek. Vissa undersökningar och mindre tester har också genomförts för de två övriga metoderna.

För tillverkning av kapselinsatsen studeras extrudering, pressning/valsning och gjutning.

I detta avsnitt redogörs för hur provtillverkningen fortskrider, för alternativa tillverkningsmetoder, för kvalitetsaspekter och för hur olika tillverkningsalternativ ter sig vid en jämförelse sinsemellan.

6.4.1 Resultat från provtillverkningen

Under 1994 inleddes provtillverkning av fyra kapslar. Kapslarna kommer att ha en insats tillverkad av ett

stålrör /6-31/. En kapsel i full skala med självbärande inre stålkapsel visas i Figur 6-3. En ny provserie på två till tre kapslar med gjuten insats planeras att påbörjas under hösten 1995.

Kopparkapseln

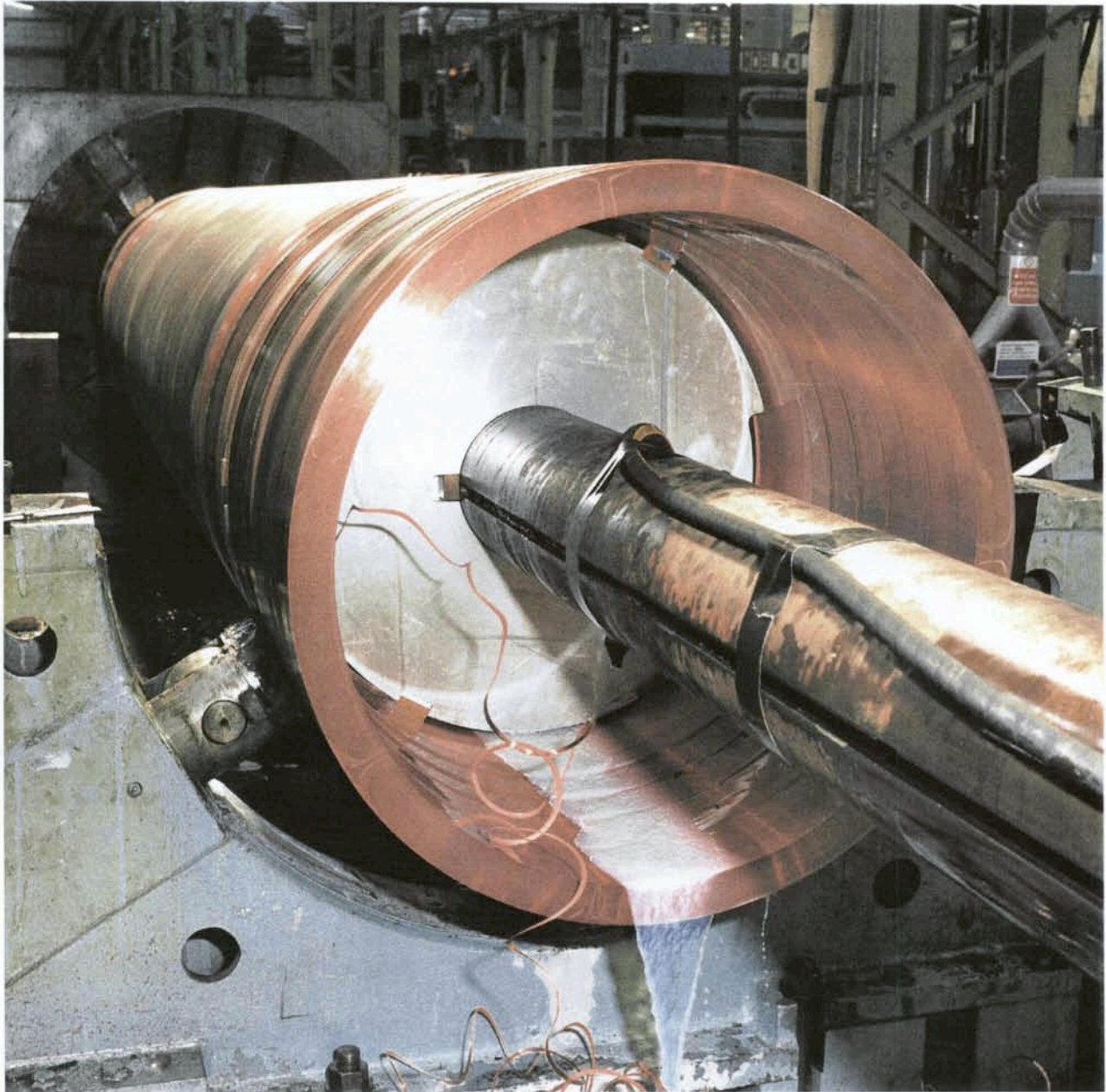
Två metoder har provats för kopparkapseln: rullpressning/kantpressning av rörhalvor med efterföljande sammanfogning med elektronstrålesvets respektive extrudering av hela rör. I båda fallen svetsas sedan en bottendel fast med elektronstrålesvets.

Den valda kopparlegeringen är inget standardmaterial. Detta i kombination med för koppar ovanliga götdimensioner gjorde att det inte fanns några standardprodukter att köpa för testerna. I ett fall byggdes gjutmaskinen om för att möjliggöra tillsats av fosfor och i ett annat fall tillverkades en ny stränggjutningsform. Den planerade årsvolymen av koppar är dock tillräckligt stor för att det skall vara motiverat för tillverkare att modifiera sina anläggningar för serieproduktion.

Valsverk med kapacitet för tillräckligt stora plåtar för rullpressning/kantpressning finns på ett flertal platser i Europa. För att få lämplig kornstorlek (för närvarande uppskattad till ca 250 μm) vid valsningen eftersträvas att reduktionen under valsningen är stor (ca 5). Vid mindre reduktion blir slutresultatet osäkrare därför att snävare



Figur 6-3. Fullskalekapsel från provtillverkning med självbärande inre stålkapsel.



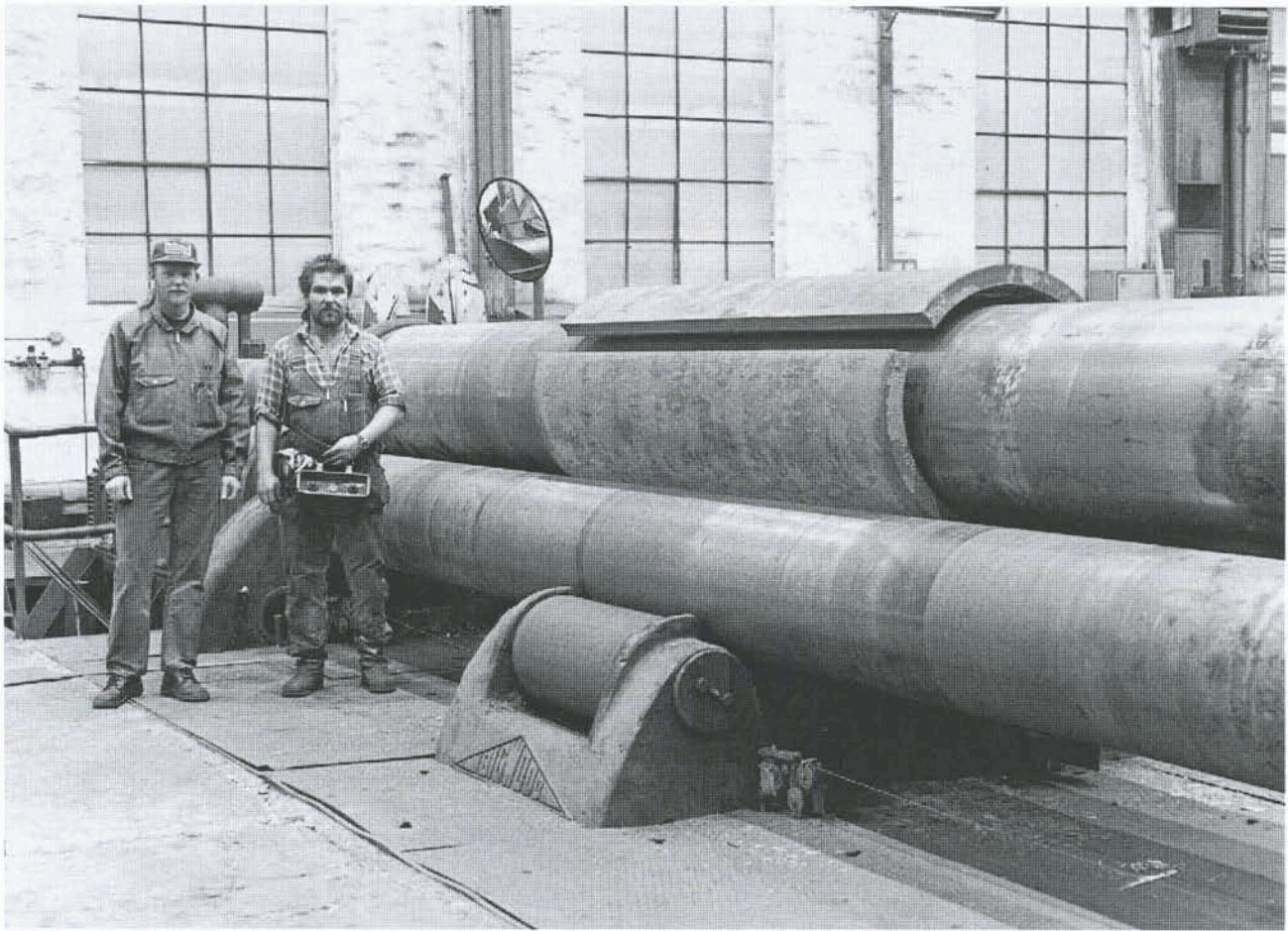
Figur 6-4. Grovbearbetning av innerdiametern på extruderat kopparrör.

intervall krävs på andra parametrar vid valsningen, t ex valsningstemperatur. Genomförda prover hos olika leverantörer har visat att det är möjligt att uppnå önskad kornstorlek även med en mindre reduktion. Totalt sex plåtar har tillverkats med en kornstorlek i området 180 till 360 μm .

Rullpressning och kantpressning är konventionella metoder för tillverkning av rör från plåt. Det viktigaste vid formningen är att framställa rörhalvorna med sådan precision att de utan orimlig bearbetningsmån kan slutbearbetas och fogas samman med elektronstrålesvetsning. Båda metoderna klarar detta precisionskrav. För provtillverkning föredrogs rullpressning eftersom den lämnar minst skador på kopparplåtens yta. Detta är önskvärt eftersom det ger ett bättre materialutbyte genom att

plåtens startjocklek kan reduceras. Formningen av plåtarna gav gott resultat, med en raket och rundhet över plåtens längd på några millimeter när.

Extrudering av kopparrör i den aktuella dimensionen har aldrig genomförts tidigare. Även i detta fall ligger en av svårigheterna i att ha kontroll över materialets kornstorlek. Provtillverkningen genomfördes vid en extruderingstemperatur på 800°C, eftersom det rädde viss osäkerhet kring vilket presstryck som skulle krävas. Det visade sig att endast ungefär en tredjedel av pressens kapacitet utnyttjades vid denna temperatur. Beträffande raket och rundhet var resultatet av provtillverkningen mycket gott. Kornstorleken i materialet var emellertid grövre än vad man hoppats uppnå. I medeltal låg kornstorleken på 800 till 1000 μm , med enstaka korn på upp



Figur 6-5. Kapselinsats formad från stålplåt för kapsel med självbärande kapselinsats.

till 2000 μm . Detta tyder på att korntillväxt skett. Provet extruderingsarna, som utförts utan annan kylning än naturlig konvektion, indikerar att korntorleken kan reduceras genom att extruderingsstemperaturen sänks. Dessutom är det möjligt att kyla materialet under extruderingen. Se Figur 6-4.

Kapselinsatsen

För kapselinsatsen studeras dels en insats baserad på ett stål rör, dels en gjuten insats. Stålrörsinsatsen har tillverkats dels genom pressning/valsning, dels genom extrudering. I båda fallen tillämpas konventionella metoder och proven har genomförts utan problem.

För den gjutna insatsen med kanaler för bränslet pågår förberedelser för provgjutningar. Även om visst utvecklingsarbete kan krävas för gjutprocessen, bedöms metoden som genomförbar.

Ur pris- och tillverkningsynpunkt är det mest gynnsamt att tillverka insatsen av gjutjärn eftersom legeringen har mycket god gjutbarhet. Om stål eller en brons väljs blir priset högre på grund av sämre materialutbyte och högre materialpriser.

6.4.2 Studier av andra metoder

För kopparkapseln studeras även het isostatisk pressning (HIP) och elektrodeponering som alternativa tillverkningsmetoder.

Het isostatisk pressning, HIP

Vid het isostatisk pressning (HIP) kompakteras kopparpulver till full densitet vid förhöjd temperatur och tryck. Förutsättningarna för tillverkning av fullstora kopparkapslar med HIP har utretts av ABB Atom och IVF /6-32/. Inga praktiska försök har genomförts av SKB sedan 1982-83. De nu aktuella utredningarna tyder emellertid på att det skulle vara möjligt att uppnå full densitet och duktilitet i kopparmaterial med korntorleken 4 till 40 μm med presstider på ca 1 timme vid 550°C och 100 MPa.

Två alternativa tillvägagångssätt diskuteras. I ena fallet tillverkas enbart en tomkapsel från kopparpulver. Med tanke på kapseln längd och de förhållandevis tunna kapselväggarna kan det visa sig vara svårt att uppnå önskad raket och rundhet. Alternativt kan kopparkap-

seln tillverkas med stålkomponenten som en integrerad del genom att kopparpulvret pressas mot stålbehållaren. Med denna metod skulle det vara lättare att uppnå önskad rakhet och rundhet på kapseln. Nackdelen med detta tillvägagångssätt är att det troligen kommer att bli höga restspänningar i kopparkörlet.

För att få goda mekaniska egenskaper vid HIP måste yttoxider på pulverpartiklarna avlägsnas. Detta kan göras med vätgas vid ca 350°C. Vid denna temperatur sker reduktionen av yttoxiden snabbt. Reduktionen kräver dock att tillräcklig mängd väte tillförs systemet. Dessutom måste bildat vatten avlägsnas. Syre löst i koppardiffunderar långsamt jämfört med väte i kopparkornen. Indiffunderat väte ger med syre inne i kopparkornen vattenånga, som sedan endast med svårighet kan diffundera ut i gasfasen och lämna systemet.

Vid de prov som utfördes 1982-83 kunde man med goda kommersiella pulverkvaliteter i storskaliga prov nå nära teoretisk densitet och mekaniska egenskaper jämförbara med smidd kopparkörlet /6-33, 34, 35, 36/. Syre- och vätehalterna i pulvermaterialet var dock väsentligt högre än i syrefritt kopparkörlet. Materialet bedömdes av den anledningen vara disponibelt för "våtesjuka" om det upphettades till höga temperaturer (ca 400°C). Denna temperatur är betydligt över temperaturen i förvaret, men uppnås i fogområdet om materialet svetsas. Metallografiska undersökningar visade också tydliga tecken på väteförspädning efter värmebehandling vid 400°C i en timme /6-37/.

Senare undersökningar har visat att goda mekaniska egenskaper även efter värmebehandling om pulvret kunde hanteras nära nog helt syrefritt från atomisering till HIP /6-38/. Trots den noggranna hanteringen av pulvret visade det sig att föroreningar på pulverkornen, troligen damm, inte kunde undvikas. Detta hade ingen inverkan på materialets mekaniska egenskaper, men kan tänkas påverka svetsbarheten. Detta måste i så fall utredas.

Det finns idag inte isostatpressar tillgängliga med tillräckliga dimensioner för att genomföra provtillverkning i full skala.

Om HIP-processen väljs som tillverkningsmetod är det troligt att investeringar måste göras i såväl pressutrustning som atomiseringsanläggning för kopparpulver.

Elektrodeponering

Vid elektrodeponering utfälles kopparkörlet direkt på insatsen genom elektrolys.

Vid inledande försök på modellnivå erhöles goda resultat. Kopparkörlet deponerades på ett flertal miniatyrkapslar. Innan försöken eventuellt fortsätter i större skala kommer den elektrodeponerade kopparkörlets mekaniska egenskaper att utredas. Preliminära undersökningar har inletts och kommer att fortsätta under de närmaste åren.

Strukturen på elektrodeponerad kopparkörlet kan i stor utsträckning styras av processparametrarna och eventuell efterföljande värmebehandling. Hittills genomförda krypprovningar har visat att materialet har dålig kryppduktilitet jämfört med referensmaterialet. Kryppproven

gjordes emellertid på material vars struktur inte var representativt för det material, som förutses för kapslarna. Kryppprovning på mer representativt material kommer därför att genomföras. Elektrodeponering har fördelen att det inte blir någon spalt mellan kapsel och insats. Detta minskar kraven på materialets mekaniska egenskaper. Materialet måste också provas med avseende på svetsbarhet och inspekterbarhet med ultraljud.

Spray forming

Med denna metod formas rör genom att spray-deponera finfördelad smält metall på en recipient. Metoden används för att industriellt för rörtillverkning. Sandvik Steel tillverkar höglegerade specialstål med dimensioner på upp till 400 mm diameter.

6.4.3 Kvalitetssäkring och kontrollmetoder

Arbetet med utformning av kvalitetssäkringsprogram för kapseltillverkning och förslutning har påbörjats i samband med pågående provtillverkning av hela kapslar.

Principen för provtillverkningen har varit att erhålla full spårbarhet för alla delar av kapseln med avseende på till exempel analys och provningsprotokoll, reparationsrapporter och värmebehandling. Avsikten har också varit att identifiera och åtgärda eventuella felaktigheter så tidigt som möjligt i operationsföljden.

Parallellt sammanställs olika testmetoder som skall tillämpas. De metoder som tillgrips är huvudsakligen konventionella.

6.4.4 Sammanfattning

Provtillverkningen av fullstora kapslar har visat att både formning från valsad plåt och extrudering är möjliga metoder för att tillverka kopparkapslar i full skala. Vid formning från valsad plåt var det möjligt att med tillgängliga göt och tillgänglig utrustning i väsentlig grad uppnå kraven på mikrostruktur i materialet. För extrudering var resultaten lovande även om de inte fullt ut motsvarade målsättningen, men att det finns goda förutsättningar att med modifierade processparametrar och eventuell kylning under extruderingen uppnå önskad kornstorlek i materialet.

Beträffande andra tillverkningsmetoder, HIP och elektrodeponering pågår studier för att bedöma värdet av att genomföra provtillverkning i full skala även med dem. I utvärderingen ingår förutom bedömningen av materialegenskaperna även en bedömning av kostnaderna för att serietillverka kapslar samt av vilken flexibilitet en viss metod ger i val av eventuella leverantörer etc.

Drifttiden för inkapslingsanläggningen kommer att stäcka sig över en tidsperiod på mer än 40 år. Det kan inte uteslutas att flera olika tillverkningsmetoder kom-

mer att användas under denna tid om alternativa metoder utvecklas och blir tillgängliga.

Verksamheten i förhållande till mål i FUD 92

- Fullfölja studierna rörande blygjutning i modellskala.
– Under perioden har arbetet inriktats helt på koppar/stål kapslar i alternativa utformningar. Insatser på det alternativet blyfylld kapsel har tillsvidare fått lägre prioritet.
- Stödja utveckling av tillverkningsteknik, svetsteknik och metoder för icke-förstörande provning. – Provtillverkning av fyra fullstora kapslar tillverkade med olika metoder pågår.

6.5 FÖRSLUTNINGSTEKNIK

Kopparkapseln skall kunna förslutas med höga krav på tillförlitlighet och täthet, samt på inspekterbarhet. Målsättningen är att högst 0,1% av alla kapslar skall få innehålla icke detekterade defekter som kan ge otäthet.

För att uppfylla de höga kraven på förslutning av kopparkapseln utvecklas en metod med användning av elektronstrålesvetsning av kopparlocket. Samma metod tillämpas även för att sätta fast bottendelen på kopparkapseln. Alla utvecklingsinsatser koncentreras för närvarande på denna metod. Alternativa metoder som har föreslagits är friktionssvetsning och diffusionssvetsning.

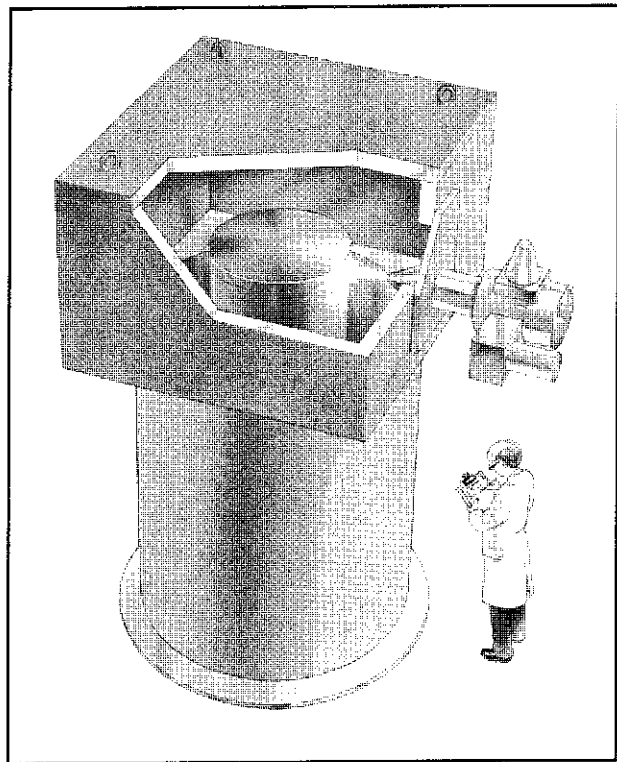
Parallellt utvecklas metoder för oförstörande provning av svetsen för att verifiera att den uppfyller ställda krav. Även arbete med kravformulering pågår.

6.5.1 Resultat från provsvetsning

Inom ramen för ett EUREKA-Projekt deltog SKB under åren 1986 till 1992 i utvecklingen av en elektronstrålesvets konstruerad för att användas utan högvakuum i tryck upp till atmosfärstryck. Efter att projektet avslutats har utrustningen som togs fram inom ramen för projektet använts för att utveckla svetsteknik för förslutning av kopparkapseln.

Ett utvecklingsprogram för svetsning av koppar under reducerat tryck genomfördes under 1992 och 1993 /6-39/. Både svetsning med horisontell och vertikal elektronstråle gjordes med syrefri ren koppar och på syrefri koppar med låg fosforhalt på raka provstycken. Huvudsyftet med arbetet var att bestämma optimalt tryck i svetskammaren för locksvetsning i tryckområdet 5 Pa till 100 kPa. Se Figur 6-6.

Inverkan av heliumtryck i svetskammaren och av avståndet mellan arbetsstycke och elektronkanon undersöktes i detalj för några olika geometrier på elektronstrålen och för effekter upp till 60 kW vid en accelerationsspänning på 100 kV. För heliumtryck under 1 kPa visade det sig att penetration på över 70 mm kunde åstadkommas utan rotdefekter över ett stort område



Figur 6-6. Elektronstrålesvetsning av kopparlock på kopparcylinder.

svetsparametrar. Detta gällde också över hela avslutningen av svetsen.

Svetsbarheten av syrefri ren koppar och syrefri koppar med låg fosforhalt var mycket lika, även om tendensen till mikroporositet var något större för det fosforhaltiga materialet.

Erfarenheterna överfördes under 1994 till svetsning av lock i full skala på kopparrör med tillräcklig längd för att ge realistiska förhållanden för locksvetsningen i inkapslingsanläggningen. Det visade sig då att vissa förändringar av lockutformningen var nödvändiga för att få ett gott resultat.

Efter att dessa genomförts kunde svetsningarna genomföras med tillfredställande resultat /6-40/. Provserien omfattade först svetsning av fem lock och avslutades därefter med att botten och lock svetsades på en 2,4 m lång kapsel med full diameter. Svetsarna har i efterhand undersökts med avseende på defekter. Svetsarna har inte varit helt defektfria, men de spridda porer som detekterats i svetsen har bedömts vara acceptabla, se även avsnitt 6.5.3.

De införda förändringarna av lockutformningen ger vissa negativa konsekvenser för den praktiska hanteringen av kapseln i inkapslingsanläggningen. Ytterligare modifieringar av lock planeras därför.

I samband med provserien gjordes temperaturmätningar på kapselns mantel under svetsningen. Utrustningens långtidsstabilitet provades och högspänningsut-

rustningen modifierades för att minska risken för och konsekvenserna av urladdningar.

6.5.2 Utredning av andra svetsmetoder

På grund av koppars stora värmeledningsförmåga kommer fogningen av locket till kapseln med metoder, där metallen smälts lokalt, att kräva hög effekttäthet. De metoder, som skulle kunna ge detta är elektronstrålesvetsning och lasersvetsning. Lasersvetsning av koppar är inte möjligt med tillgängliga utrustningar.

Alternativa metoder skulle kunna vara processer, där fogningen sker utan att kopparn behöver värmas till smältpunkten. De intressantaste är friktionssvetsning, diffusionssvetsning och lödning. Friktionssvetsning sker med mycket hög energitillförsel och ger snabb fogning. De övriga metoderna kräver relativt långa hålltider. Det betyder att hela kapseln med bränsle måste värmas till en fogningstemperatur på några hundra grader. Förslutningen av kapseln tar alltså betydligt längre tid i anspråk än med andra metoder.

Friktionssvetsning

Friktionssvetsningen har utretts både teoretiskt och vid praktiska försök. Det första utredningen gjordes av TWI /6-41/, som utförde svetsprover på kopparrör i skala 1/4. Försöken ansågs lyckade med finkornigt material i både svets och värmepåverkad zon, synbarligen utan defekter. Baserat på dessa tester bedöms det möjligt att friktionssvetsa i full skala. En utredning av IVF /6-42/ bekräftade TWI slutsatser.

Utrustning för fullskaleförsök finns inte tillgänglig, men bedöms som fullt möjlig att tillverka. Tills vidare betraktas friktionssvetsning därför som ett reservalternativ, som kan aktualiseras om elektronstrålesvetsningen inte ger tillräckligt goda resultat.

Diffusionssvetsning

I samband med testerna av hetisostatpressning (HIP) av kopparpulver utfördes också diffusionsfogning (500°C, 150MPa) av locket som en integrerad del av testerna /6-33, 34, 35, 36/. Flera olika metoder för fogpreparering provades för att avlägsna oxider på kopparytorna, men någon egentlig korntillväxt över fogytan kunde inte observeras. Fogytan liknade i utseende närmast en korngräns, som löpte genom hela väggjockleken. Den korngränsliknande fogen skulle kunna vara en svaghetszon och bland annat en anvisning till korngränsskorrosion. Vid detta tillfälle gjordes inte någon systematisk undersökning av processparametrarna (tryck och temperatur).

6.5.3 Oförstörande provning

Brottseghetsmätningar utförda på material med svets visar att kopparen har exceptionellt hög brottseghet. Brottmekanismen för någon defekt i svetsen kommer att domineras av plastisk kollaps. Detta betyder att restspänningarna i svetsen saknar betydelse och att endast yttre last behöver beaktas. För de aktuella förhållandena skulle en innesluten defekt motsvarande två tredjedelar av väggjockleken med en betydande längd kunna godkännas /6-43/. Defekter av denna storlek kan utan svårighet upptäckas med ultraljud, även i mycket grovkornigt material.

Mot bakgrund av materialets höga skadetålighet kommer största tillåtna defekt att bestämmas av hur mycket reduktion av väggjockleken, som kan tolereras ur korrosionssynpunkt. Som framgick av diskussionen i 6.2.2 är säkerhetsmarginalerna mot genomfrätning på 100 000 år mycket stora. För djupare liggande defekter kan mycket stora defektutbredningar tolereras, medan yt nära och ytbrytande defekter kan tjäna som anvisningar för spaltkorrosion. Detta gäller tiden omedelbart efter deponering. Det innebär i detta sammanhang upp till maximalt 300 år. Arbetet med att fastställa acceptanskriterier för defekter i svetsar och grundmaterial pågår.

Undersökningar av krypspricktillväxt pågår. Resultaten hittills tyder på att inom mätnoggrannheten kan ingen tillväxt observeras. Ytterligare prov kommer att genomföras för att få bättre underlag för en bedömning.

Metodutveckling för oförstörande provning pågår med ultraljud och digital radiografi.

Prov har utförts med ultraljud puls-eko på kopparblock med artificiella defekter. Frekvensområdet var 2,25-5 MHz och materialet var varmvalsad koppar med kornstorlek på 180-250 µm. Den känslighet, som kunde uppnås motsvarade 0,5 mm sidborrade hål /6-44/. Totalt sju locksvetsar har provats med ultraljud. Alla undersöktes med puls-eko av kompressionsvågor ovanifrån svetsen, de flesta med manuell avsökning /6-45/. Detaljer från två lock provades med digital radiografi. Fyra lock undersöktes också med konventionell radiografi, som referens till ultraljudsprovningen. Antal och fördelning av defekter varierade betydligt mellan svetsarna. Detta visade sig vara användbart för att prova känsligheten hos de olika metoder som användes.

De viktigaste observationerna var:

- Digital radiografi kan vara en användbar teknik antingen som huvudalternativ eller som komplement till ultraljudsprovning. Utifrån de preliminära arbeten som gjorts förefaller tekniken möjlig för att detektera defekter ned till omkring 1 mm i diameter.
- Puls-eko tekniken kunde detektera defekter i svetsen ner till 2 mm i diameter med ett signal till bakgrunds-förhållande på 6 dB. Detekterbarheten för defekter var inte alltid direkt relaterad till storleken.

- Gel som kopplingsmedium, i stället för immersion i vätska, gav ibland otillräcklig koppling och vatten som kontaktmedium är att föredra.
- För djupare liggande defekter är detekterbarheten fullt tillräcklig med såväl digital radiografi som ultraljud. Möjligheterna att komplettera dessa metoder för detektering av ytbrytande defekter bör utredas ytterligare.

6.5.4 Sammanfattning

Uppnådda resultat visar att elektronstrålesvetsning är en användbar metod för att tillverka och försluta koppar-kapslar. Fullt tillfredställande resultat från arbetet med utveckling av metoder för oförstörande provning har ännu inte erhållits, utan kommer att kräva ytterligare insatser. De förändringar i lockutförningen, som var nödvändiga, kan komma att komplicera hanteringen i inkapslingsanläggningen. Utprovning av alternativa lockutförningar kommer att bli nödvändigt.

Verksamheten i förhållande till mål i FUD 92

- Stödja utvecklingen av tillverkningssteknik, svetsteknik och metoder för icke förstörande provning. – Utvecklingen av svetsteknik har genomförts till en nivå där locksvetsar kan göras med elektronstrålesvets utan rotdefekter i fogområdet även under avslutningen av svetsen. Utvecklingen av metoder för icke förstörande provning har pågått planenligt med såväl ultraljud och radiografi.

6.6 INKAPSLINGSANLÄGGNINGEN

I FUD-program 92 presenterades planen att bygga en inkapslingsanläggning i anslutning till CLAB. Förprojektering av anläggningen pågår för närvarande. Underlag för ansökan om att få uppföra den skall vara klart under 1997. Underlaget skall bland annat omfatta en miljökonsekvensbeskrivning för inkapslingsanläggningen. En viktig del i denna är anläggningsbeskrivning och preliminär säkerhetsrapport.

6.6.1 Lokalisering och MKB-process

För inkapslingen planeras en tillbyggnad vid SKBs centrala lager för använt kärnbränsle, CLAB, vid Oskarshamnsverket. En sådan samlokalisering ger klara fördelar i jämförelse med andra förläggningalternativ i fråga om logistik för bränslehantering, resursutnyttjande och miljöpåverkan.

- Befintliga system och anläggningsdelar i CLAB kan till en del användas för inkapslingsprocessen. Omfattningen är beroende av om en integrerad eller en fristående lösning väljes för utbyggnaden. Byggnadsbehovet för inkapslingsanläggningen blir därmed mindre.
- Tillgången till annan kärnteknisk infrastruktur är god vid Oskarshamnsverket och CLAB.
- Den erfarenhet av bränslehantering samt drift och underhåll av tillhörande servicesystem som finns hos personalen vid CLAB kommer bäst till användning om arbetet samordnas organisatoriskt och på en plats.
- Transporterna till djupförvaret kan genomföras med ett enklare behållarsystem då bränslet är inkapslat än om bränsle ska transporteras från CLAB till en annan plats för inkapsling. Antalet transporter ökar dock med 40-50% då antalet bränsleelement per behållare blir färre i en kapsel än i en bränsletransportbehållare.
- Inkapslingsanläggningen får plats inom SKBs fastighet för CLAB. Miljöpåverkan blir därmed minimal. Ny mark behöver inte tas i anspråk och det krävs inga nya vägar eller kylvattenanläggningar. Emissioner till luft och vatten beräknas ligga inom de ramar som gäller för CLAB anläggningen (Oskarshamnsverket och CLAB).

Under 1994 bildades en samrådsgrupp för MKB-frågor för inkapsling vid CLAB med deltagande av Oskarshamns kommun, länsstyrelsen i Kalmar län, statens kärnkraftinspektion, statens strålskyddsinstitut och SKB. För att tidigt få en översikt över de miljökonsekvenser en inkapslingsanläggning kan få inleddes MKB-arbetet med en förstudie. Syftet med förstudien var att ge en översikt över projektet samt att belysa vilka alternativ som finns beträffande lokalisering och utformning. Resultatet redovisas i en förstudierapport /6-46/.

6.6.2 Inkapslingsprocessen

Inkapslingsanläggningen ska utformas och byggas för att främst inrymma inkapslingsprocessen. Dessutom ska anläggningen senare kunna kompletteras med en processlinje för behandling av härdkomponenter. Vid utformningen av anläggningen beaktas speciellt frågor rörande drift och underhåll samt arbetarskydd och radiologisk säkerhet.

De funktionsdelar som planeras ingå i anläggningen förutom själva inkapslingsprocessen är.

- Behandling av härdkomponenter.
- Utrymmen för godshantering.

- Servicesystem.
- Utrymmen för driftpersonal.
- Utrymmen för underhållsverksamhet.

Inkapslingsprocessen ska utformas och konstrueras för levererans av noga utförda och kontrollerade kapslar med bränsle till djupförvaret. Vid utformningen beaktas speciellt frågor rörande driftsäkerhet och radiologisk säkerhet. Arbetet med utformning och konstruktion av en lämplig process för inkapsling av bränslet kan indelas i funktionsdelar där olika tekniska lösningar kommer att övervägas. Projekteringen av anläggningen har påbörjats och preliminära beskrivningar av inkapslingsprocessen /6-47/ och anläggningens utformning /6-48/ har utarbetats. Nedanstående översiktliga beskrivning av inkapslingsprocessen ligger till grund för det fortsatta projekteringsarbetet. Se Figur 6-7.

Transport av bränsle

Bränslet transporteras i lagringskassetter från förvaringsdelen i CLAB via befintlig bränslehiss till ett nytt bassängblock i inkapslingsanläggningen.

Beredning av bränsle

Identifiering av bränslet samt mätningar och förmodligen någon form av sortering ska utföras i hanteringsbassängen. Även i detta steg används vatten som kylmedel och strålskydd.

Hanteringscell för bränsle

Bränslet förs upp ur vattnet till hanteringscellen där det torkas och placeras i en kapsel, se Figur 6-8. I denna del av anläggningen där bränslet hanteras fritt ställs speciella krav så att spridning av radioaktivitet förhindras. Utrymmet utformas med strålskärmande väggar och speciella krav på täthet och ventilation. Denna typ av utrymme brukar benämnas högaktiv cell. För hanteringen i cellen väljs en typ av hanteringsmaskin som bygger på beprövad teknik m h t höga krav på tillförlitlighet och säkerhet. Möjligheter till service och underhåll beaktas speciellt.

Övriga inkapslingsfunktioner förläggs till separata arbetsstationer.

Transport av fyllda kapslar

Transporten planeras ske i ett utrymme som ansluter under hanteringscellen och de olika arbetsstationerna.

Alternativa transportsystem studeras och valet görs m h t höga krav på tillförlitlighet och säkerhet. Under transporten är kapseln försluten så att radioaktiva ämnen inte kan spridas från bränslet.

Tre stationer för förslutning av kapseln

Den första arbetsstationen ska innehålla de funktioner som behövs för att byta atmosfär i kapseln och om så erfordras kringfylla bränsleelementen. Slutligen ska stållocket monteras och förslutas. Därefter finns ingen risk för spridning av radioaktivitet från bränslet. Även denna arbetsstation utformas med de krav som gäller för en högaktiv cell.

Kopparlocket läggs på och försluts i en svetsstation. Utformningen av svetsstationen bygger på det pågående arbetet med utveckling av en teknik med elektronstråle-svetsning. Materialet i kopparlocket och kopparcylindern smälts samman med en elektronstråle i en vakuumkammare.

Den sista av de tre stationerna ska inrymma utrustning för dels kontroll av locksveits, dels för maskinbearbetning av svetsområdet på kapseln och även för att kunna avlägsna ett felaktigt sveitsat lock. Resultatet av förslutningen ska kontrolleras genom oförstörande provning med teknik som utvecklas samtidigt med förslutningstekniken.

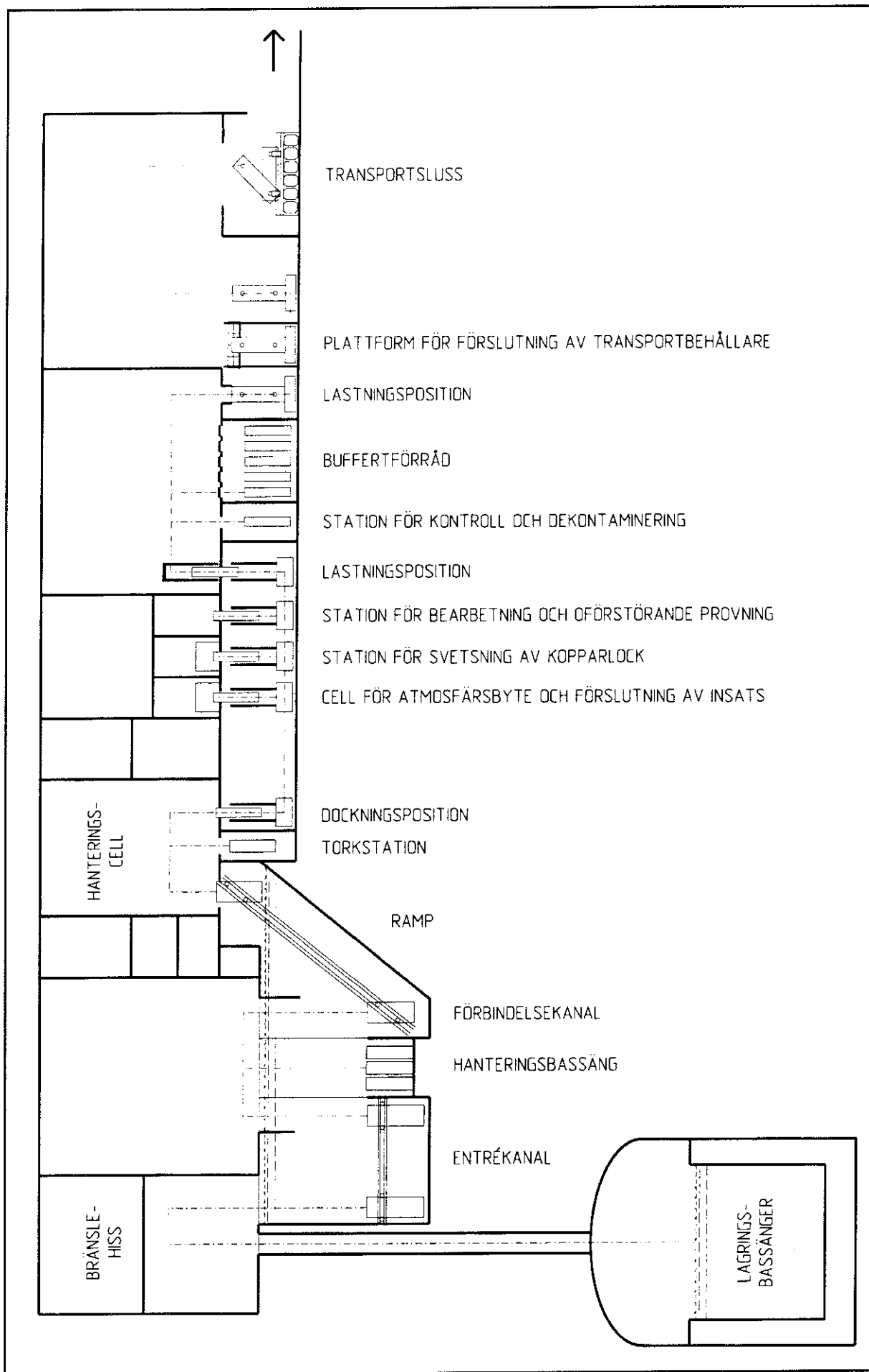
Efterbehandling och mellanlagring

En rutinmässig kontroll av ytkontaminering planeras och möjlighet till dekontaminering av kapselns utsida ska finnas i en särskild arbetsstation.

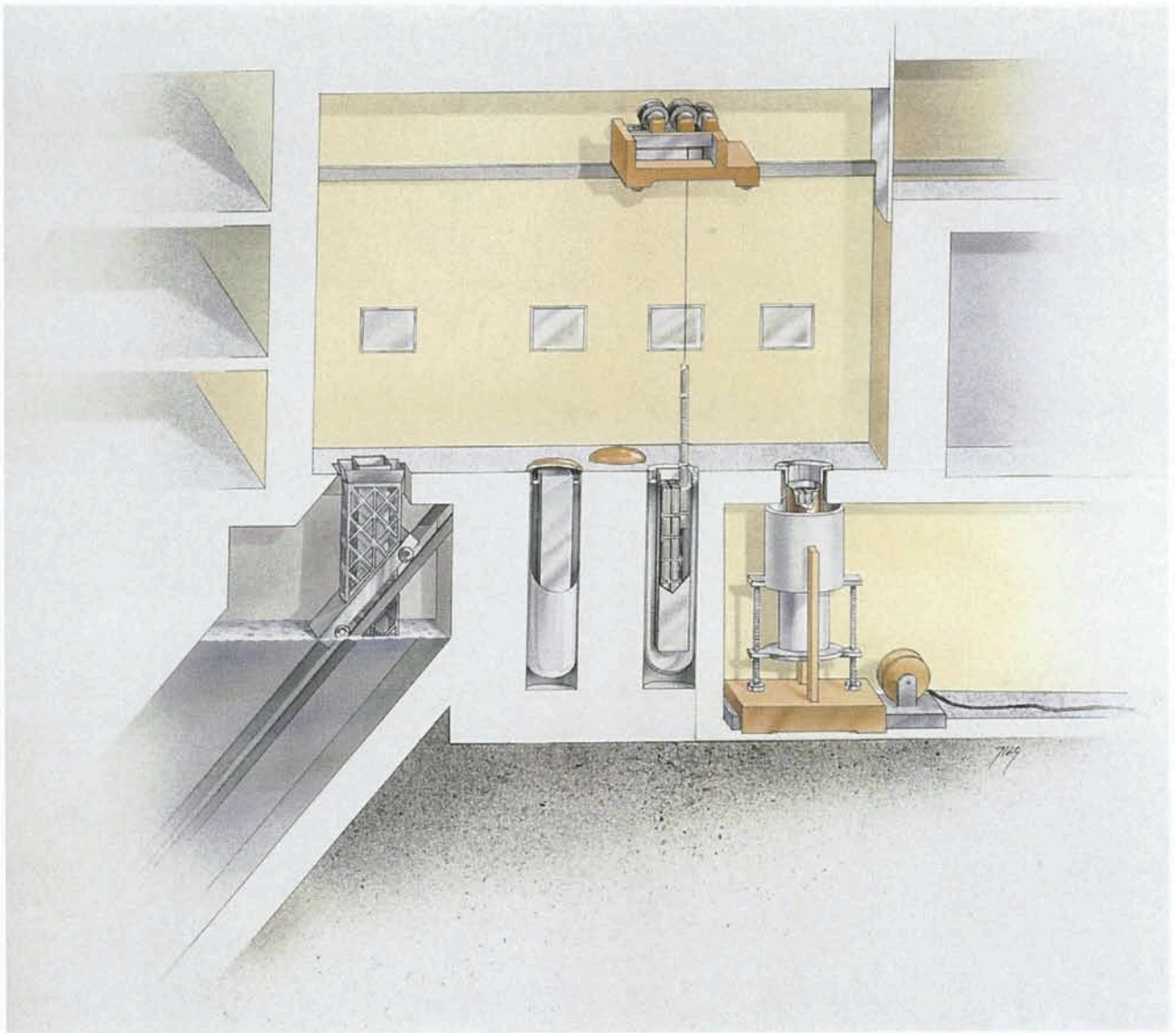
Ett buffertförråd för fyllda och förslutna kapslar planeras för att kapslar ska kunna levereras till djupförvaret i lämplig takt. Hanteringen i buffertförrådet planeras ske med en strålskärmande hanteringsklocka. Förrådet ska ha anslutning till en dockningsplats för transportbehållare.

Hantering av underkända kapslar

Om kontrollen av förslutningen visar att sveitsen inte är godkänd förs kapseln i första hand tillbaka till svetsstationen där den sveitsas om. I den händelse omsveitsning inte går att utföra eller inte lyckas går kapseln tillbaka i processen för avtagning av lock och urtagning av bränsle som placeras i en ny kapsel.



Figur 6-7. Översikt över de olika stegen i inkapslingsprocessen.



Figur 6-8. Hanteringscellen där bränslet tas upp ur vattnet, torkas och placeras i kapslar.

7 PROGRAM FÖR KAPSEL OCH INKAPSLING

7.1 FÖRUTSÄTTNINGAR OCH MÅL

Förutsättningar

Programmet för kapsel och inkapsling omfattar främst utveckling och tillverkning av kapsel för använt kärnbränsle samt projektering och byggande av en inkapslingsanläggning. Detta arbete benämns "Projekt inkapsling".

I ett senare skede skall även övrigt långlivat avfall behandlas i inkapslingsanläggningen. Exempel på sådant avfall är hårdkomponenter, t ex styrtavar, och andra interna delar från reaktortanken, vilka blivit aktiverade genom neutronbestrålning under reaktorernas drift. Dessa komponenter planeras bli ingjutna i betong. Vissa förberedelser för en senare komplettering med sådan utrustning görs vid projektering och byggande av inkapslingsanläggningen. Erforderliga transporter kommer att ske i transportbehållare av samma typ som idag används för transporter av använt bränsle från kärnkraftverken till CLAB.

Mål för arbetet med kapsel och inkapslingsanläggning

Kopparkapseln ska utformas för att uppfylla kravet på inneslutning av bränslet under erforderlig tid i djupförvaret.

Utformningen av kopparkapseln ska utvecklas så att den kan tillverkas och förslutas på ett tillförlitligt sätt. Egenskaper som är väsentliga för den långsiktiga säkerheten ska beaktas i valet av materialkvaliteter och metoder för tillverkning, förslutning och kontroll.

Inkapslingsanläggningen ska utformas och byggas för att leverera noga utförda och kontrollerade kapslar med bränsle till djupförvaret. Vid utformningen beaktas speciellt frågor rörande driftsäkerhet och radiologisk säkerhet.

SKBs planering är baserad på följande delaktiviteter när det gäller arbetet med kapsel och inkapslingsanläggning.

Kapseln:

- Utveckling och utformning av kopparkapseln.
- Utveckling av förslutningsteknik.
- Utveckling av tillverkningsteknik.

Anläggningen:

- Projektering av inkapslingsanläggningen.
- Bygge och montage.
- Driftsättning och provdrift.

Den planerade arbetsgången beskrivs i kapitel 7.3 med utgångspunkt från skedesindelningen för stegvis projektering av anläggningen. Planerade aktiviteter för arbetet med kapseln beskrivs sedan mer utförligt i efterföljande kapitel.

För närvarande pågår en utredning om möjligheten att prova de vitala utrustningarna för kapselförslutningen i en pilotanläggning. Underlag för beslut om genomförande planeras föreligga under 1996. I den följande beskrivningen av programmet förutsättes att beslut då fattas om fortsatt arbete med en pilotanläggning.

Viktiga delmål i planeringen är att:

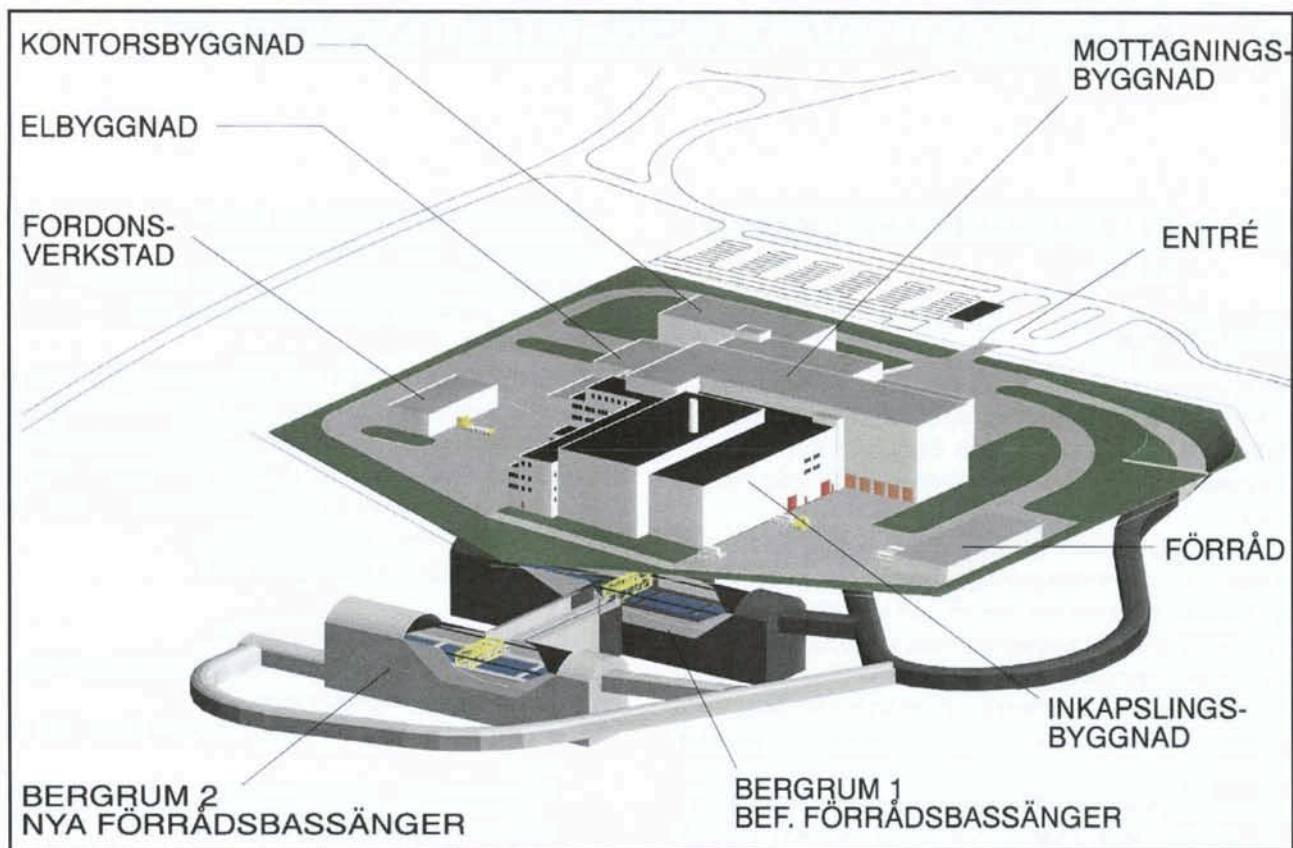
- Fastställa kapselns utformning.
- Färdigställa MKB-dokument och säkerhetsrapport för inkapslingsanläggningen.
- Färdigställa en pilotanläggning för kapselförslutning.
- Sammanställa tillståndsansökan för inkapslingsanläggning vid CLAB (enligt naturresurslagen och kärntekniklagen).
- Utvärdera och redovisa resultat från pilotanläggningen.
- Erhålla regeringstillstånd för byggstart för inkapslingsanläggningen.
- Starta serietillverkning av kapslar.
- Starta provdrift för inkapslingsanläggningen.
- Utarbeta slutlig säkerhetsrapport som underlag för ansökan om tillstånd för inledande drift.
- Erhålla drifttillstånd och starta inledande drift för inkapsling av bränsle.

Underlag för en tillståndsansökan bedöms föreligga vid årsskiftet 1997/98. Tillståndsprövning, bygge, driftsättning och provdrift bedöms därefter kunna genomföras så att de första kapslarna är färdiga för leverans till djupförvaret år 2008.

7.2 ALTERNATIVA LOKALISERINGAR OCH PROGRAM

I arbetet med miljökonsekvensbeskrivning, MKB, för inkapslingsanläggningen kommer olika aspekter av lokaliseringalternativ att belysas. Huvudinriktningen är att anläggningen byggs i anslutning till CLAB. Ett alternativ som är naturligt att belysa är placering i anslutning till djupförvaret.

I MKB-arbetet skall även ett nollalternativ belysas även om det i detta fall inte existerar något nollalternativ i absolut mening. Däremot kan man tänka sig en fortsatt lagring i CLAB under viss tid i avvaktan på att en annan



Figur 7-1. Översikt över planerad inkapslingsanläggning vid CLAB samt nytt bergrum för bränslelagring.

metod föreligger för att slutligt ta hand om bränslet. Detta kallas i det följande nollalternativet.

Fortsatt lagring i vattenbassängerna i CLAB innebär inte några radikala förändringar i förhållande till dagens driftsituation. Detta innebär att CLAB hålls i drift med kylning och rening av vatten och med bibehållen ventilation. Ett fortlöpande underhåll på aktiv utrustning kommer att krävas. När inget bränsle längre tas emot kan bemanningen minskas något.

Som underlag för en bedömning av hur länge CLAB med lämpligt underhåll kan hållas i fortsatt drift behöver en utredning genomföras av olika mekanismer som kan påverka anläggningen och bränslet, t ex korrosion. Vidare behövs en utredning av förväntat underhållsbehov, bland annat för att bedöma kostnaderna för fortsatt drift. Slutligen sammanställs olika miljökonsekvenser vid fortsatt drift. Preliminärt bedöms en lagring under 100 år eller mer vara tekniskt möjlig.

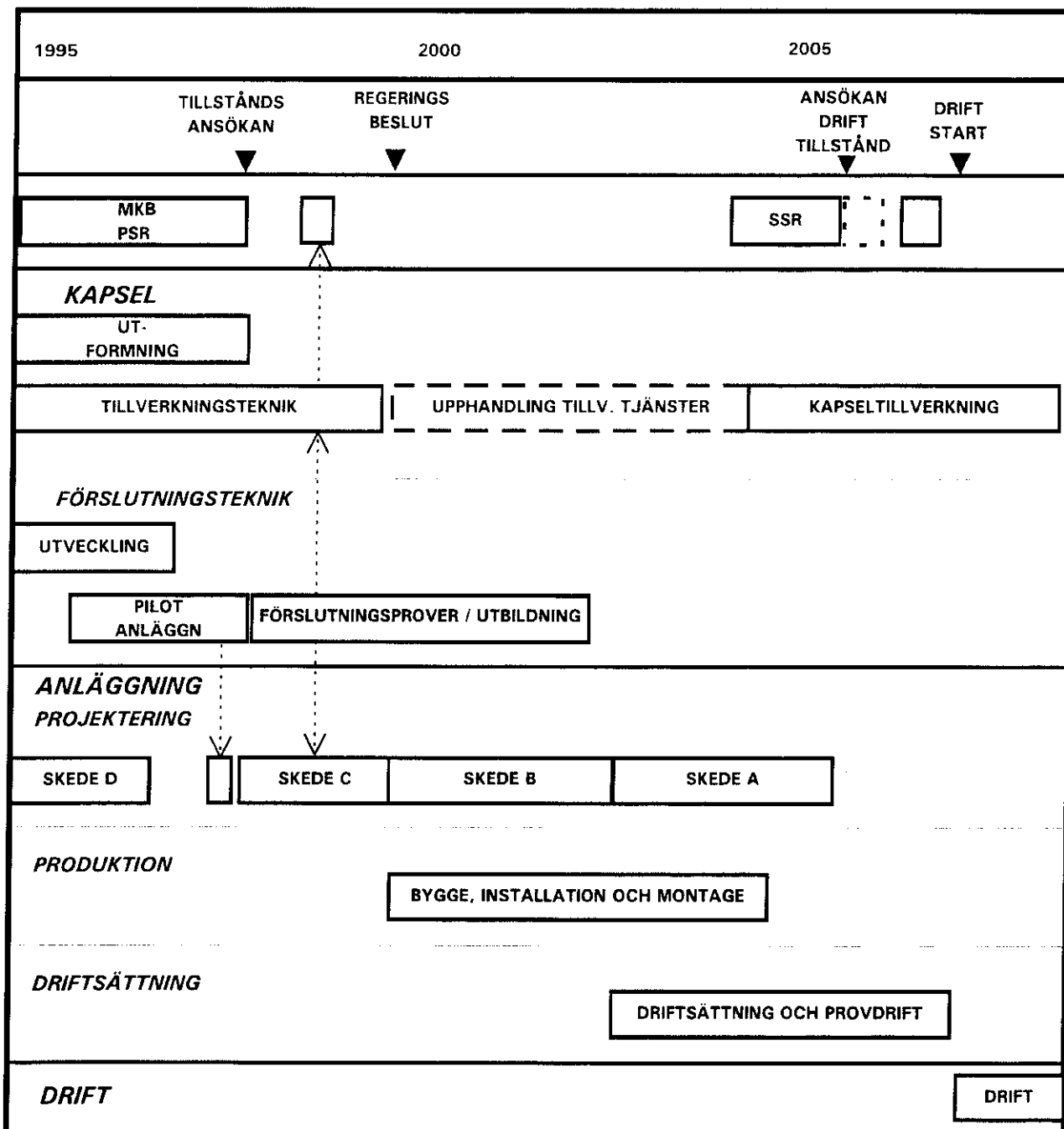
För alternativet fortsatt lagring i 50 år eller mer i CLAB, bör man även överväga möjligheten att föra över bränslet till torra lagringsbehållare av liknande typ som t ex används i Tyskland. Därigenom skulle behovet av driftövervakning minska, samt behovet av kylning och rening av bassängvatten och av ventilation att falla bort.

En utredning av konsekvenser och kostnader för detta alternativ planeras också ingå i utredningen.

7.3 PROJEKTERING AV INKAPSLINGSANLÄGGNINGEN SAMT KOPPLINGAR TILL ARBETET MED KAPSELUTVECKLING

Projekteringen av inkapslingsanläggningen följer ett program för stegvis projektering. Förstudier har genomförts och redovisats i en preliminär anläggningsbeskrivning. Det fortsatta arbetet omfattar följande skeden med tillhörande sammanställningar av anläggningsutformning och kapselutveckling:

- Förprojektering (Skede D).
- Konstruktion (Skede C).
- Detaljkonstruktion (Skede B).
- Dokumentation (Skede A).



Figur 7-2. Översiktlig tidsplan 1995-2008.

Utformningen av kapseln samt utveckling av metoder för tillverkning kontroll och förslutning följer ett separat program som kopplar till de olika skedena i den stegvisa projekteringen.

I projekteringsarbetet ingår att planera för en framtida komplettering av anläggningen med utrustningar för in-gjutning av hårdkomponenter. Vissa utrustningar och byggnadsdelar för hantering av kapslar planeras att även kunna användas för motsvarande hantering av kollin för hårdkomponenter. Beroende på möjligheten till framtida

montage och driftsättning av dessa kompletterande utrustningar kommer förberedelserna att bli olika för olika delar i processen.

Även transportbehållare för dels kopparkapslar med bränsle, dels kollin med hårdkomponenter ingår i projekteringsarbetet.

Nedan beskrivs översiktligt vad som planeras att genomföras i de olika projekteringskedena dels för anläggningsutformningen, dels för arbetet med utveckling och provtillverkning av kapseln. En närmare beskrivning

av det planerade arbetet med kapselutformning, förslutningsteknik och anläggningsutformning ges i de följande avsnitten.

Varje steg i utvecklingsarbetet för kapseln följer en metodik omfattande i princip följande steg.

- Problemformulering och inventering av alternativ.
- Beslut om val av handlingslinje.
- Planering och genomförande.
- Sammanställning och utvärdering av resultat.

I samband med beslut om handlingslinje övervägs risker att den valda metodiken inte leder till önskat resultat och de konsekvenser detta då kan få för efterföljande steg i arbetet med kapsel och anläggningsutformning.

Förprojektering (Skede D)

Förprojekteringskedet ska ligga till grund för SKBs beslut om att söka tillstånd för inkapslingsanläggningen.

Anläggningsutformning

I detta skede studeras och optimeras de ingående systemen. Funktions och säkerhetsanalyser genomförs. Anläggningsbeskrivning och systembeskrivningar utarbetas som underlag till den preliminära säkerhetsrapporten och miljökonsekvensbeskrivningen.

Kapsel

Under skede D förutses följande aktiviteter genomföras för arbetet med kapseln:

- Kompletterande tester för kapselmaterial.
- Huvudprinciper för kapselns utformning fastställs.
- Provning av tillverknings- och kontrollmetoder för kapseln.
- Tillverkning av provkapslar i full dimension.
- Utredning av förutsättningar för serieproduktion.
- Förslutningstekniken provas på provkapslarna.
- Kontrollmetoder för svetsfogen provas och utvecklas.
- Alternativa fogutformningar provas.
- En pilotanläggning för locksvetsning byggs.

Övrigt

En utformning av transportbehållare för kopparkapslar fastlägges som underlag för utformning av hanteringsutrustningen i inkapslingsanläggningen.

Konstruktion (Skede C)

Konstruktionsskedet ska främst ligga till grund för upphandling av byggnadsarbeten och de olika systemen i inkapslingsanläggningen, samt för planering av det kommande byggskedet.

Anläggningsutformning

Byggnadsutformningen bearbetas med ledning av beskrivningar för de ingående systemen och utrustningarna. Byggnadsstommen anpassas till förekommande belastningar, strålskärningskrav m m och med hänsyn till montagevägar för utrustningar. Preliminära huvudritningar upprättas.

Kompletterande beskrivningar för utrustningar till de olika systemen upprättas och övriga handlingar som ska ingå i upphandlingsunderlagen utarbetas.

Kapsel

Under skede C förutses följande aktiviteter för arbetet med kapseln.

- Detaljutformning av kapseln fastställs.
- Provtillverkningar av kapslar genomförs.
- Provsvetsningar genomförs i pilotanläggningen.
- Metod för serietillverkning fastställs.

Övrigt

Kravspecifikation för transportbehållare utarbetas som underlag för förfrågningshandlingar.

Detaljkonstruktion (Skede B)

I detta skede utarbetas arbetshandlingar för bygget och för tillverkning och montage av de olika systemen i anläggningen.

Anläggningsutformning

Leverantörerna genomför detaljkonstruktion av utrustningar för de olika systemen.

Anläggningsutformningen fastställs med underlag från systemleverantörerna. Huvudhandlingar upprättas byggnadsstommen och arbetshandlingar utarbetas för byggnadsarbetena.

Kapsel

Fortsatta provtillverkningar hos leverantörer och provsvetsningar i pilotanläggningen förutses under skede B.

- Erforderliga avtal om serieproduktion träffas med leverantörer

Dokumentation (Skede A)

Anläggningsutformning

Relationshandlingar upprättas och slutliga systembeskrivningar utarbetas som underlag för driftsättning och slutlig säkerhetsrapport.

Kapsel

Resultat från provtillverkningen samt från provsvetsning i pilotanläggningen sammanställs och dokumenteras.

7.4 UTVECKLING OCH UTFORMNING AV KAPSEL

7.4.1 Kriterier för dimensionering och utformning

Arbetet med utformning av kapseln planeras ske i steg genom sammanställning av grundförutsättningar, egenskapskrav samt kriterier för dimensionering och utformning i enlighet med procedurbeskrivningen i kapitel 6. Dessa sammanställningar ligger sedan till grund för slutligt val av kapselutformning. Nedan beskrivs planeringen för arbetet med de olika frågorna som påverkar kapselns utformning.

Långtidssäkerhet och funktion i djupförvaret

Initial täthet

Sannolikheten för oupptäckta defekter som kan leda till tidigt kapselbrott analyseras med utgångspunkt från valda metoder. I avsnitt 6.2.3 angivet värde för vad som kan accepteras kan komma att ändras med ledning av bl a säkerhetsanalyser för djupförvaret.

Hållfasthet

Belastningsförutsättningar enligt avsnitt 6.2.3 ses över med ledning av djupförvarets planerade utformning och de scenarios som behandlas i säkerhetsanalysen. Säkerhetsfaktorer för normala laster ska fastställas liksom kriterier för bedömning av extrema laster.

Korrosionsbeständighet

Slutsatser beträffande korrosionsbeständigheten bedöms inte påverkas i någon större utsträckning av de lokala variationer som kan accepteras för valet av förläggningsplats. Med hänsyn till osäkerheter i underlaget och risk för ej kända lokala variationer i förhållandena bör godstjockleken dock väljas med hänsyn till det största djup på korrosionsskada som erhållits i dessa beräkningsfall med tillägg av en säkerhetsfaktor. Denna princip för bestämning av koppertjocklek ska fastställas.

Kunskapen om hur koppars korrosionsegenskaper påverkas av mikrostruktur och legeringsämnen ska kompletteras i den mån så erfordras m h t val av tillverkningsmetoder.

Värmeöverföring

Beräkningar av värmetransport i djupförvaret ska sammanställas som underlag för bestämning av gränsvärde för värmeöverföring från kapsel till bentoniten.

Stråldos

Gräns för stråldos från kapseln ska slutligt fastställas med utgångspunkt från vad som kan accepteras m h t främst risk för radiolys av vattnet i kapselns omgivning.

Kriticitet

Kapseln ska utformas så att bränslet förblir underkritiskt även vid ett vatteninbrott. Kriterier för verifierande beräkningar ska fastställas.

Kemisk påverkan

Materialet i kapseln ska inte kemiskt påverka de andra barriärernas funktion. Kopparmaterialet förutses inte medföra någon sådan påverkan. Några ytterligare studier förutses därför inte på detta område.

Mekanisk påverkan

Kapselns upplagstryck mot bentoniten begränsas så att den mekaniska stabiliteten bibehålls. När kapselns utformning är fastställd genomförs en verifierande beräkning.

Driftsäkerhet, tillverkning och hantering

Tillverkning och kontroll av kapslar

En tillförlitlig metod för tillverkning och kontroll av erforderlig kapselproduktion med bibehållen kvalitet ska tas fram. Beroende på metodval leder detta till att den planerade tillverkningskedjan analyseras med avseende på kvalitetskrav och erforderliga kontroller som t ex

- Mikrostruktur i materialet.
- Porositet och ytfinhet.
- Hållfasthetsegenskaper.
- Kontroll av tillverkningssvetsar.

Transport av kapslar till inkapslingsanläggningen

Kapsel med "emballage" ska tåla transport utan skador. Metoder för avsyning och kontroll för fastställande av kapselns status efter transport ska utarbetas.

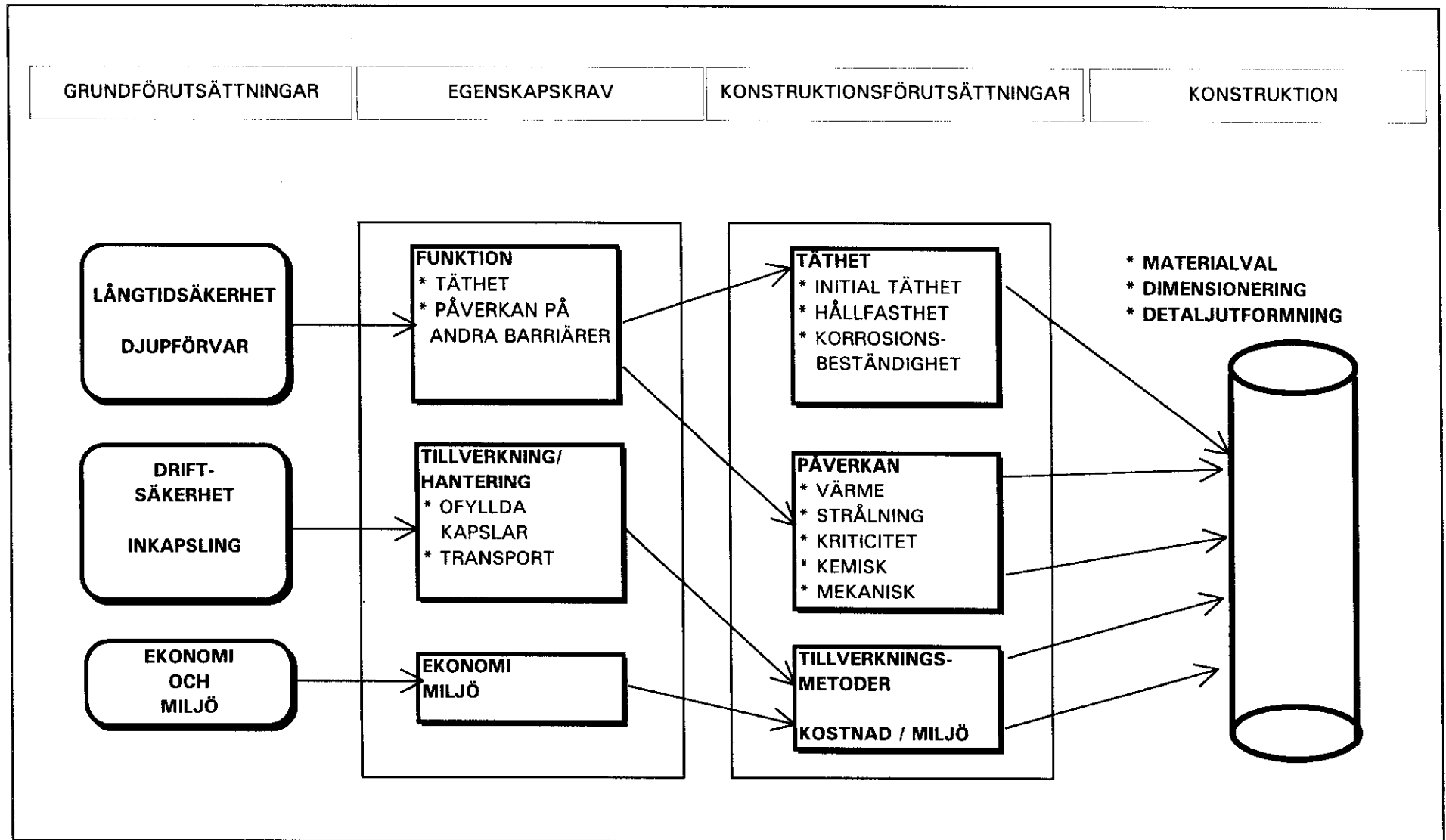
Hantering av kapsel i inkapslingsanläggningen

Insatsen i kapseln ska utformas så att förekommande typer av bränsleelement kan inplaceras med anläggningens utrustning.

- Locket till insatsen ska utformas med hänsyn till inkapslingsprocessens krav på byte av atmosfär i kapseln och täthet vid förslutning av kopparlocket.
- Strålningen från kapseln behöver inte begränsas m h t hanteringen i inkapslingsanläggningen då kapseln för olika moment är försedd med extra strålskydd.
- Kapseln ska utformas för erforderliga lyft.

Förslutning och efterbehandling

Kopparlocket ska utformas så att det kan förslutas med elektronstråleteknik och så att kontroll av svetsen kan utföras. Svetsområdet ska utformas för att kunna uppfylla krav på ytfinhet efter maskinbearbetning. Kapseln ska utformas så att utsidan kan dekontamineras vid behov.



Figur 7-3. Översikt över delmoment i arbetet med kapselutformning.

Hantering av fyllda kapslar

Krav på kapselns integritet vid eventuella haverifall vid hantering i inkapslingsanläggningen eller vid transport i behållare ska fastställas.

Ekonomi och miljö

Sammanställning av ekonomi- och miljökriterier ska genomföras. Olika utformningar av kapseln kostnadsberäknas och utvärderas med hänsyn till ekonomi och säkerhet. De valda kapselmaterialets miljöeffekter ska analyseras.

7.4.2 Dimensionering och utformning av kapseln

När konstruktionsförutsättningarna är fastlagda genomförs det slutliga arbetet med fastläggande av kapselns detaljutformning. Detta arbete kan indelas i följande steg.

Materialval och materialtester

Mekanisk provning och krypprovning kommer att fortsätta i den omfattning som krävs för att:

- verifiera utfallet från provtillverkning,
- kvalificera material från alternativa tillverkningsmetoder.

Dessutom kommer provningen av svetsat gods för att verifiera svetsens materialegenskaper att fortsätta under perioden.

Känsligheten för spänningskorrosionssprickning hos koppar och stål kommer att utredas ytterligare.

Mikrostrukturens stabilitet över långa tidsperioder kommer att studeras närmare.

Som underlag för det slutliga materialvalet utförs:

- Genomgång av kravspecifikation för kopparmaterialet och för materialet till inre behållaren.
- Sammanställning och utvärdering av möjliga material för kapseln.

Dimensionering

Detta arbete består av flera huvuddelar, nämligen:

- Bestämning av inre tvärsnittsarea och längd m h t till dimensioner hos förekommande bränsleelement och antalet element per kapsel.
- Utformning av erforderliga insatser eller styrningar för bränsleelementen i kapseln.
- Dimensionering av väggjocklekar för stål och koppar främst m h t dimensioneringskriterierna beträffande; mekanisk stabilitet och strålning.

- Kontrollberäkning med hänsyn till missödesfall vid hantering och transport.
- Kontroll av yttre dimensioner främst m h t krav på begränsning av värmeöverföring och mekanisk påverkan på bentoniten.

Kriticitetsberäkningar

Ett program för verifiering av att bränslet förblir underkritiskt i kapseln även vid ett eventuellt vatteninbrott kommer att genomföras. Beräkningarna kommer med etappvis stigande detaljeringsgrad att belysa inverkan av bl a följande faktorer:

- Geometri och materialegenskaper hos den valda insatsen med variationer inom givna toleransgränser.
- Eventuell förekomst av neutronabsorbator i insatsmaterialet liksom av materialdefekter tex håligheter.
- Yttre förhållanden såsom neutronreflektion från stål, koppar, bentonit och vatten.
- Stora förändringar i geometri och materialsammansättning förorsakade av vatteninträning i kapseln med åtföljande korrosion av insatsmaterialet.
- Eventuell kreditering för bränslets utbränning.
- Ändring av isotopsammansättningen och reaktiviteten i det mycket långa tidsperspektivet om kredit tagits för bränslets utbränning.

För den långsiktiga säkerheten kommer även kriticitetsanalyser att genomföras för fall med andra hypotetiska fördelningar av uran och plutonium utanför kapseln i djupförvaret.

Detaljutformning av lock

Det inre stållocket detaljutformas m h t de krav som ställs för lyft och fastsättning av detta lock samt eventuella ytterligare krav från inkapslingsprocessen.

Kopparlocket detaljutformas m h t de krav som ställs för lyft av locket och eventuellt hela kapseln samt för genomförande av förslutningssvets och kontroll av densamma.

Kemisk miljö i kapseln

Vid ett vatteninbrott påverkas den kemiska miljön i kapseln av grundvattnet, buffertmaterialet och övriga material i kapseln närområde, samt av materialen i bränslet och i själva kapseln. Arbetet med att granska effekten sådana materialblandningar fortsätter.

Gasbildning i kapseln vid eventuell vatteninträning påverkas av materialvalet för den inre behållaren. Studier för innerbehållare av stål har genomförts. Ytterligare granskning av vätgasbildande korrosion av gjutjärn planeras.

7.4.3 Alternativa kapselutformningar

Den tidigare studerade utformningen av kopparkapseln med fyllning av smält bly runt bränsleelementen utgör reservalternativ till kopparkapseln med inre stålbehållare. Tillsvidare planeras inga studier av den blyfyllda kapseln. I den händelse resultaten från utvecklingsarbetet de närmaste åren visar att kapseln med inre stålbehållare inte uppfyller uppställda krav, så kan arbetet med den blyfyllda kapseln återupptas. Detta kan dock innebära en påverkan på tidplanen för inkapslingsanläggningen. Omfattningen är beroende av när ett sådant beslut fattas.

7.5 UTVECKLING AV TILLVERKNINGSTEKNIK

Kapselns kopparhölje planeras att framställas genom tillverkning av en kopparcylinder som förses med en kopparbotten. Botten och kopparcylindern fogas samman med elektronstrålesvets. En innerbehållare placeras i kopparhöljet före leverans till inkapslingsanläggningen.

Två metoder för tillverkning av kopparcylindrar har provats och utvärderats (se kapitel 6). Dessa prov visar att kopparcylindrar i planerade dimensioner kan tillverkas med den kvalitet som erfordras. Studier av andra tänkbara metoder för serieproduktion av kopparhölje till kapslar har också genomförts.

Innerbehållare i form av stålcyllindrar har provtillverkats för användning i de första kapslarna. Närmast planeras provtillverkning av gjutna insatser i stål och järn.

Studierna av tillverkningsmetoder har hittills varit inriktade på att prova om det är möjligt med tillgängliga metoder att framställa kapslar av den planerade utformningen. Det fortsatta arbetet inriktas nu på utveckling av tillverknings- och kontrolltekniken så att kapslar med lämpliga och kvalitetssäkrade egenskaper kan tillverkas industriellt.

Tillverkning av ytterligare provkapslar planeras genomförd i flera steg. Dessa provkapslar kommer att användas för provning av förslutningstekniken samt senare vid den inaktiva provdriften i inkapslingsanläggningen. I nästa steg fortsätter utvecklingen av tillverknings- och kontrollteknik med ytterligare ett antal kapslar fram till dess tillståndsansökan färdigställs för inkapslingsanläggningen.

De provtillverkningar, som för närvarande planeras är:

Gjutna insatser: stål, segjärn, ev brons

Provtillverkning av gjutna insatser kommer att genomföras för att utreda förutsättningar att tillverka insatser i full skala. För gjutstål, som svetsas med tillfredställande resultat, kan kapselinsatsen tillverkas i två delar med halv längd, som svetsas samman.

Valsade och svetsade kopparrör

Kopparkapslar till gjutna insatser kommer att tillverkas, dels för att få erfarenheter från fler valsämnesleverantörer och dels för att få erfarenhet av fler tillverkare av rör från formad plåt.

Extruderade kopparrör

De extruderingsmetoder, som hittills gjorts gav tillfredställande resultat vad avser rundhet och rakhet. Emellertid genomfördes extruderingsmetoder vid hög temperatur (800°C), som kan vara orsaken till den observerade korntillväxten i materialet. Extrudering vid lägre temperatur (600°C) kan ge bättre mikrostruktur i materialet. Dessutom kommer kopparhöljet till den gjutna insatsen att få en större diameter än de tidigare extruderade rören.

Parallellt med dessa fortsatta prov med redan prövade metoder kommer eventuellt prov att utföras med HIP-teknik och med elektrodeponering. Innan beslut om detta fattas kommer ytterligare studier att genomföras.

Het Isostatisk Pressning

För HIP-tekniken planeras bland annat utredningar om:

- tillgänglighet och kvalitetskrav på kopparpulver.
- nödvändigt vakuum för att få acceptabel produkt och förutsättningarna att uppnå detta på en 5 m lång kapsel.
- tillverkning av provbitar för materialtester, undersökning av materialstruktur och funktionsprovning (ultraljudsprovning, svetsprovning)

Resultaten från utredningar och materialprovningar avgör ifall provtillverkningar skall göras. Med hänsyn till tillgängligheten på HIP-anläggningar kan tills vidare endast en kapsel med reducerad längd men med full diameter tillverkas. Tillverkning av fullängdskapsel kräver investering i en ny HIP-press.

Elektrolytisk påläggning av koppar

Den tillverkning av elektrolytiskt kopparmaterial för provning, som nu pågår fortsätter. Provningen kommer att omfatta materialprovning, undersökning av materialstruktur och funktionsprovning (ultraljudsprovning, svetsprovning). Resultaten från dessa prov kommer att avgöra om programmet skall utökas till tillverkning av modellkapslar i full diameter.

Utvärdering

Med dessa provtillverkningar och alternativutredningar som underlag sker utvärdering av vilka metoder som kan vara lämpliga för serietillverkning. Som underlag för utvärderingen krävs även bedömning av kostnaderna för

att serietillverka kapslar med olika metoder, samt av vilken flexibilitet i val av leverantörer etc metoden ger.

Tillverkningsmetoder som ger likvärdiga slutprodukter förutses komma att väderas efter den kostnad som krävs för att uppnå rätt kvalitet med respektive metod. För att kunna värdera en metod korrekt krävs därmed att alla tillverkningskrav på kapseln kvantifierats. Välbeprövade tillverkningsmetoder kan vara att föredra i jämförelse med nya och oprövade lösningar vid utvärdering av olika metoder.

Drifttiden för inkapslingsanläggningen kommer att stäcka sig över en tidsperiod på mer än 40 år. Det kan inte uteslutas att flera olika tillverkningsmetoder kommer att användas under denna tid om alternativa metoder utvecklas och blir tillgängliga.

7.6 UTVECKLING AV FÖRSLUTNINGSTEKNIK

För att uppfylla de höga kraven på förslutning av kopparkapseln utvecklas en metod för förslutning med användning av elektronstrålesvetsteknik. Metoder för icke förstörande provning ska även utvecklas och användas för verifiering av att förslutningen uppfyller uppställda krav.

Arbetet med utveckling av förslutningstekniken planeras ske i följande steg.

Elektronstrålesvetsteknik

Utrustningen som använts vid hittills genomförda försök behöver vidareutvecklas för att uppfylla kraven som ställs i inkapslingsprocessen då en kapsel ska kunna förslutas per dag. Detta arbete har påbörjats med strömförsörjningsdelen där en ny utrustning för närvarande är under utveckling för att en högre tillförlitlighet ska uppnås.

Närmast planeras en försöksserie med lutande svetsfog som alternativ till den horisontella som provats hittills. Detta för att förenkla lockutformningen och minska risken för driftstörningar och problem vid utförande i radioaktiv miljö.

Kontrollmetoder

För att förvissa sig om fullgod integritet hos kapseln ska dels en noggrann tillverkningskontroll ske för metallbehållarna, dels en kontroll efter förslutningen av kapseln. Metoder för dessa kontroller ska bestämmas och vid behov utvecklas samtidigt med fastställande av metoder för tillverkning och förslutning av kapseln.

Tekniken för provning med ultraljud framförallt behandling och tolkning av signaler ska utvecklas. Detta arbete har påbörjats och kommer att fortsätta i anslutning till fortsatt svetsningsarbete. I planen ingår utformning och tillverkning av samt prov med en utrustning för serietillverkning av förslutningssvetsar.

Användning av röntgenteknik som alternativ eller komplement till ultraljudsprovningen har provats på bitar av provlocken med gott resultat. Liksom för ultraljudsprovningen planeras utformning och tillverkning av samt prov med en utrustning lämplig för användning i inkapslingsprocessen under de kommande åren.

Även virvelströmsprovning är en metod vars tillämplighet kommer att studeras och utvärderas för användning i kontrollarbetet.

Acceptanskriterier för avvikelser som kan framkomma vid provningen i de olika stegen för kapseltillverkning och förslutningssvetsning ska utarbetas.

7.7 PILOTANLÄGGNING FÖR KAPSELFÖRSLUTNING

För utveckling och samprovning av utrustningar för förslutningssvetsning och oförstörande provning övervägs en pilotanläggning. Utrustningarna till denna anläggning utformas med inriktning på att de ska kunna ingå i inkapslingsanläggningens svetsstation. Erfarenheterna ska ligga till grund för slutlig utformning av denna del i inkapslingsprocessen.

Utrustningen som tillverkas för detta provändamål kan alternativt komma till användning i en anläggning för tillverkning av kapslar där det beroende på tillverkningsmetod kan behövas motsvarande utrustning för svetsning av botten på kopparkapseln.

Motivet för byggande av en pilotanläggning är främst att få ett bra underlag för fortsatt projektering av inkapslingsanläggningen. Utan denna verifikation av funktionen och utrustningarnas utformning måste en stor och kostsam flexibilitet projekteras och byggas in i anläggningen för att möjliggöra eventuellt erforderliga modifieringar i samband med provdriften.

Arbetet med pilotanläggningen planeras ske i följande steg:

- Utarbetande av funktionsspecifikationer.
- Projektering.
- Detaljprojektering och upphandling.
- Bygge och montage.
- Drifftagning.

En första provserie bör genomföras, utvärderas och rapporteras innan beslut om byggstart för inkapslingsanläggningen fattas. Anläggningen används sedan för fortsatta driftprov av utrustningar samt för utbildning av drift och underhållspersonal.

7.8 UPPFÖRANDE OCH DRIFT AV INKAPSLINGSANLÄGGNINGEN

Ett beslut av SKB om byggande av inkapslingsanläggningen planeras ligga till grund för ansökan om erforder-

derliga tillstånd för uppförande och drift. Formerna för upphandling och byggande av inkapslingsanläggningen planeras bli fastlagda i samband med detta beslut. Förberedelser för upphandling av bygge och installationer kan genomföras samtidigt med tillståndsprovningen så att det är möjligt att påbörja byggarbetena så snart tillstånd erhållits.

Byggnads- och montagearbetena är av samma karaktär som de tidigare arbetena för CLAB. Efter driftsättning av de olika utrustningarna planeras en period med samfunktionsprovning av hela inkapslingsprocessen (inaktiv provdrift). En serie kapslar ska genomgå de olika hanteringsstegen innan bestrålat bränsle tas in i inkapslingsanläggningen för en första provdriftperiod (aktiv provdrift). Resultat från provdriften sammanställs, utvärderas och rapporteras. Rapporterna ligger sedan till grund för ansökan om rutinmässig drift av inkapslingsanläggningen.

I en framtida etapp kompletteras inkapslingsanläggningen med installationer för ingjutning av hårdkomponenter. De erforderliga bygg- och montagearbetena ska förberedas i första byggnadsetappen så att störningen på drift av inkapslingsprocessen blir så liten som möjligt under denna etapp. Driftsättning och provdrift genomförs på samma sätt som ovan beskrivits för inkapslingsprocessen.

Transportbehållare för kapslar och hårdkomponenter ska tillverkas, provas och godkännas innan de tas i drift. En första behållare för kapslar tas fram i ett tidigt skede för samfunktionsprov med transportsystem och hanteringsutrustningar i inkapslingsanläggningen och djupförvaret.

7.9 SÄKERHET, KVALITET OCH SAFEGUARD

Säkerhetsredovisningar

Frågor rörande den radiologiska säkerheten i inkapslingsanläggningen analyseras och redovisas i två steg.

Preliminär säkerhetsrapport, PSR

Anläggningens säkerhet beskrivs baserat på den projektering som genomförs under 1994-97. Den nivå som då uppnåtts benämns layout D. Rapporten ska beskriva säkerhetsfrågor för hanteringsprocessen främst tänkbara missöden och dess konsekvenser.

Slutlig säkerhetsrapport, SSR

Säkerheten redovisas för den färdiga anläggningen. Underlag till rapporten utgörs av anläggningsbeskrivning och slutliga systembeskrivningar, layout A.

Resultat av inaktiv provdrift med tillverkning av ett antal kapslar redovisas år 2006 som komplement till SSR för myndigheternas provning av drifttillstånd enligt KTL.

Frågor rörande kapselns långsiktiga funktion behandlas i säkerhetsanalysen för djupförvaret.

Funktions- och riskanalyser

Inkapslingsanläggningen med ingående system analyseras med avseende på normala driftfunktioner och de risker för störningar som kan kartläggas. Detta arbete bedrivs i flera steg under projekteringsarbetet. De driftfall och därmed sammanhängande konsekvenser som på detta sätt kommer fram utvärderas och åtgärdas med lämpliga konstruktionsändringar.

Kvalitetssäkring

Den övergripande målsättningen för kvalitetssäkringen inom inkapslingsprojektet följer "SKBs riktlinjer för kvalitetssäkringsarbete".

Målet för kvalitetsarbetet i projektet är att säkerställa att:

- anläggningen och kapslarna får den kvalitet som behövs för kapselns säkra funktion och hantering och för säker drift av anläggningen,
- den dokumentation som tas fram under tillstånds-, konstruktions- och byggprocessen blir korrekt, tydlig, spårbar och möjlig att granska,
- myndigheternas krav på kvalitetssäkring för kärntekniska anläggningar uppfylls,
- projektarbetet blir effektivt med klara beskrivningar av mål samt organisationens ansvar och befogenheter samt
- information om projektarbetets framåtskridande sprids till alla berörda.

En projekthandbok har upprättats som ett verktyg för att underlätta arbetet i projektet och utgöra ett styrmedel som säkerställer att projektarbetet bedrivs med god kvalitet så att uppställda projekt- och kvalitetsmål kan nås. Hänsyn har tagits till "Kvalitetssystem – Krav vid konstruktion, utveckling, produktion, installation och service" (SS . ISO 9001) där den är tillämplig.

Kvalitetssäkring kapselproduktion

För de olika momenten vid tillverkning och förslutning av kapslar utarbetas ett kvalitetsprogram omfattande kontrollmetoder och acceptanskriterier. Kapslarnas slutliga egenskaper dokumenteras genom de kontroller som genomförs. Data från kontrollredovisningen ska överföras till säkerhetsanalysen tillsammans med data om de bränsleelement som inkapslats i respektive kapsel. Särskilda rutiner för redovisning av färdiga kapslar avseende kontrolldokumentation för kapsel med tillhörande bränsleelement ska utarbetas för detta ändamål. Metod för märkning av kapsel för identifiering vid hantering och slutlig deponering ska tas fram.

Safeguard

Hantering av använt bränsle omfattas av IAEAs (International Atomic Energy Agency) regler om safe-

guard. Övervakning sker även genom SKIs och Euratoms försorg.

Den planerade inkapslingsprocessen analyseras därför med hänsyn till krav på safeguard för det använda bränslet. Åtgärder vidtas i projekteringsarbetet för att uppfylla sådana krav som t.ex mätning på bränsleelement, övervakning av tänkbara uttransportvägar, identifiering av kapslar och installation av övervakningsutrustningar.

Det ställs även krav på att utrymmen ska finnas i anläggningen för Euratoms inspektörer.

Varje kapsel förutses bli försedd med en identifikation som är unik för denna och data om bränsleinnehålllet ska dokumenteras. Metoder och rutiner för detta ska utarbetas.

Safeguardfrågor behandlas och redovisas i särskild ordning till SKI och de internationella organen.

8 KUNSKAPSLÄGE – DJUPFÖRVAR

I detta kapitel redovisas hur långt arbetet har kommit med planeringen av ett djupförvar för använt kärnbränsle och annat långlivat avfall. Redovisningen är översiktlig och en mera detaljerad information om uppnådda resultat finns i de rapporter som SKB löpande publicerar. I kapitel 9 redovisas planer för kommande arbete.

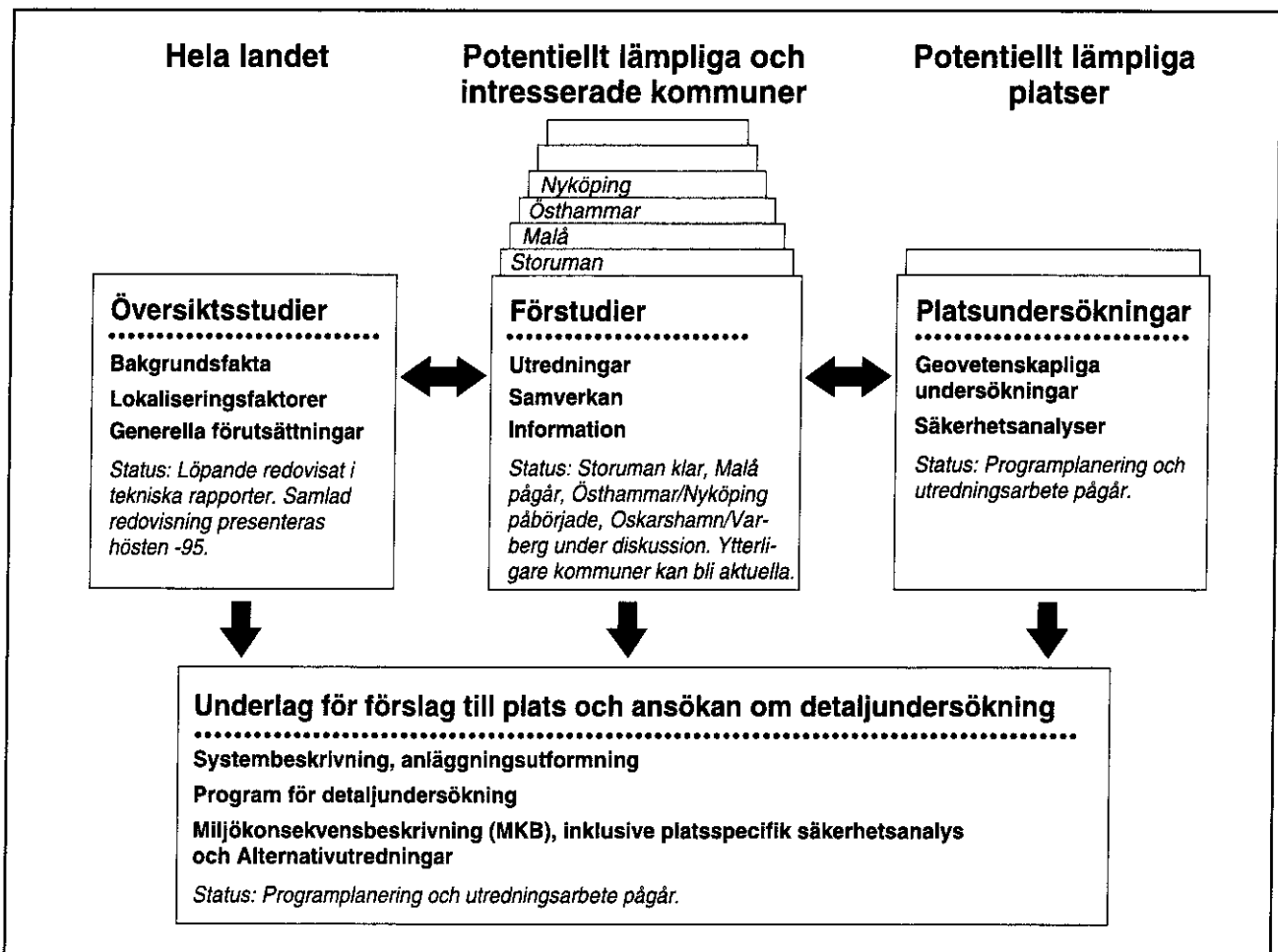
Arbetet med djupförvaret har hittills huvudsakligen omfattat följande aktiviteter:

- framtagning av underlag och planer för hur djupförvaret skall utformas, byggas, drivas och förslutas,
- genomförande och sammanställning av lokaliseringsstudier (översiktsstudier, förstudier) som underlag till kommande val av plats för djupförvaret,

- framtagning av underlag och planer för hur platser skall undersökas och utvärderas.

Huvudkomponenterna i lokaliseringsarbetet redovisas schematiskt i Figur 8-1 inklusive vad som hittills har genomförts eller pågår för respektive komponent.

I förhållande till FUD-program 92 kan allmänt konstateras att det tar längre tid att genomföra de första stegen i lokaliseringen än vad som då antogs. En annan förändring är regeringsbeslutet från maj 1995 som innebär att tyngdpunkten vid granskningen om djupförvarets lokalisering nu ligger vid ansökan om detaljundersökningar (se kapitel 9). I övrigt är dagsläget följande beträffande ovannämnda aktiviteter:



Figur 8-1. Huvudkomponenter i lokaliseringsarbetet samt genomförda och pågående aktiviteter.

Projekteringsarbetet för djupförvarets utformning och drift ligger väl i fas med FUD-program 92. Genomarbetade planer finns nu för hur djupförvaret allmänt sett kan utformas och hur transportererna kan utformas. Nästa projekteringssteg med högre detaljeringsnivå startar när det finns tänkbara platser redovisade, d v s under platsundersökningsskedet.

Översiktsstudier av hela landet och en förstudie har genomförts. Andra förstudier pågår eller förmodas starta under den närmaste tiden. Tidpunkt för start av platsundersökningar beräknas nu till tidigast under 1996 (se kapitel 9) vilket innebär en försening med ett par år jämfört med den tidsplan som presenterades i FUD-program 92.

Beträffande program för platsundersökningar kan konstateras att planarbetet ligger i fas med övriga lokaliseringsaktiviteter vilket innebär att programmet kommer att vara klart i god tid innan platsundersökningar startar.

8.1 UTFORMNING, BYGGE, DRIFT OCH FÖRSLUTNING AV ETT DJUPFÖRVAR FÖR ANVÄNT KÄRNBRÄNSLE OCH ANNAT LÅNGLIVAT AVFALL

Ett djupförvar är en medelstor industri med anläggningar både under och ovan jord. Hur dessa anläggningar skall utformas så att de tekniskt, miljö- och säkerhetsmässigt ger en optimal funktion kräver långsiktig och noggrann planering.

Nyckelfrågor för att uppnå ett väl fungerande djupförvar är:

- hur skall ovan- och underjordsanläggningarna utformas?
- vilka byggmetoder är lämpliga för underjordsanläggningarna?
- hur skall deponeringen genomföras?
- hur kan djupförvaret förslutas?
- hur kan man ordna möjligheter för återtagbarhet och övervakning?
- hur skall god arbetsmiljö tillförsäkras?
- hur kan man försäkra sig om att allt använt bränsle verkligen deponeras i djupförvaret och att det inte tas därifrån i hemlighet (safeguard)?
- vilka miljöeffekter blir det av bygge och drift?
- vilka samhällsliga effekter får anläggningen där den lokaliseras?
- hur kan transporter av radioaktivt avfall och återfyllnadsmaterial ordnas?

Dagsläget beträffande kunskap om dessa frågor redovisas nedan. En redogörelse beträffande transporter till djupförvaret finns i avsnitt 8.4. Dagsläget beträffande alternativa förvarskoncept beskrivs i kapitel 13.

8.1.1 Anläggningsutformning

Den centrala verksamheten vid djupförvaret är att ta emot kapslar med använt kärnbränsle och att deponera dem i utvalda positioner ca 500 m nere i berget. Under den reguljära driften kommer även visst annat radioaktivt avfall att deponeras i djupförvaret. För att genomföra detta krävs:

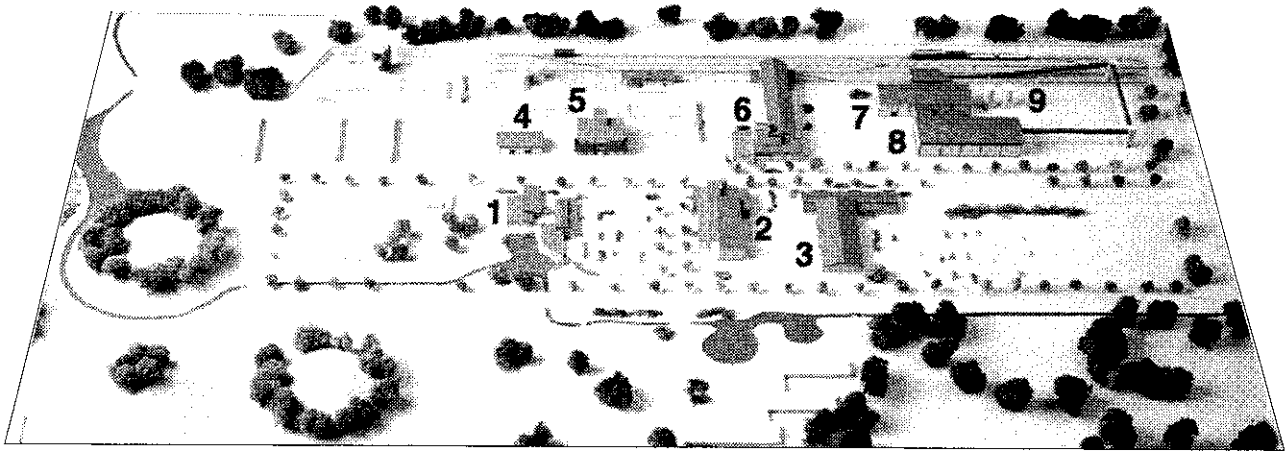
- geovetenskapliga undersökningar, projektering, tunneldrivning, utsprängning av bergum, borring av deponeringshål, etc,
- nedtransport och placering av kapseln och omgivande bentonitbuffert i deponeringshål,
- nedtransport och placering av annat radioaktivt avfall i bergum,
- efterarbeten i form av eventuell instrumentering, återfyllnad av deponeringstunnlar och bergum samt kontroll m m.

Som stöd för denna centrala verksamhet behövs vid djupförvaret bland annat:

- deponeringssystem, maskiner,
- transportanordningar (eventuell bangård),
- mottagningsstation ovan jord,
- mekanisk verkstad,
- anläggning för lagerhållning och preparering av bentonit och återfyllnadsmaterial,
- byggnader för kontor, inpasseringskontroll, matsal och information,
- anläggningar för diverse teknisk service (ventilation, vatten, avlopp).

Hur arbetet genomförs med att projektera dessa verksamheter beskrivs i kapitel 9. Generellt kan konstateras att det finns väl beprövade metoder och maskiner för de flesta av de funktioner som planeras ingå i ovanjordsanläggningarna. En principiell bild över hur ovanjordsanläggningen kan utformas visas i Figur 8-2 i vilken man antagit ett plant industriområde. Det finns goda möjligheter att anpassa utformningen till lokal topografi och förhållanden i övrigt på den aktuella platsen. Utrymmebehovet för ovanjordsanläggningarna uppskattas till ca 0,3 km².

Krav på och principer för djupförvarets olika funktioner har studerats och sammanställts i Anläggningsbeskrivningar /8-1, 2, 3/. Dessa utgår ifrån generella förutsättningar om var djupförvaret kan komma att lokaliseras och från allmänna bergtekniska förutsättningar baserade på resultaten från de undersökningar på typområden som SKB gjort. I dokumentationen exemplifieras utformningen av byggnader, markområden, bergum, tunnlar, schakt etc ovan och under jord. Deponeringen av använt bränsle exemplifieras för referenskonceptet KBS-3, se avsnitt 2.2, medan deponeringen av annat långlivat avfall exemplifieras med SFR-liknande metod. Tre olika beskrivningar har gjorts för de tre principiellt olika nerfartssystemen:



Figur 8-2. Principiell utformning av djupförvarets ovanjordsdel. 1. Information och restaurang; 2. Kontor och verkstad; 3. Personalutrymmen och förråd; 4. Försörjningsbyggnad (vatten/värme); 5. Ventilationsbyggnad; 6. Driftbyggnad (mottagning/kontroll av behållare); 7. Produktionsbyggnad (för bentonitblock m m); 8. Sandförråd och 9. Bentonitförråd.

- rak ramp,
- schakt,
- spiralramp.

Vilket nedfartssystem som är lämpligast beror på tekniska faktorer men även på lokala förhållanden. Det finns exempelvis goda möjligheter att lokalisera ovanjordsanläggningen så att hänsyn tas till tekniska krav på markförhållanden och till konkurrerande markanvändningsintressen samtidigt som underjordsdelen förläggs optimalt ur säkerhetssynpunkt. Detta kan ske genom att sidledes separera ovanjord- och underjordsdelarna med hjälp av en sluttande ramp eller, i ett schaktalternativ, genom att en tunnel med motsvarande längd drivs på djupförvarsnivån. Figur 8-3 visar en principskiss på hur djupförvaret kan utformas med en sluttande ramp och där underjordsanläggningarna är sidoförskjutna i förhållande till ovanjordsanläggningen.

Anläggningsbeskrivningarna förutsätter också att hela djupförvaret under jord placeras i ett plan. Under 1980-talet skissades på förvaring i två plan med 100 m mellan nivåerna /8-4/. Frihetsgraden att planera för fler än ett plan kvarstår men torde vara intressant endast i speciella fall då den horisontella utbredningen av bra berg är begränsad.

Studier har visat på alternativa layouter som bättre utnyttjar tunnlar än vad som är möjligt med en kapsel per hål i vertikala hål under sulan. Alternativet är horisontell placering i hål borrade i tunnelväggen, varvid hål kan borraras åt båda håll /8-5/. En ytterligare utveckling är ett system med två kapslar i varje hål /8-6, 7/.

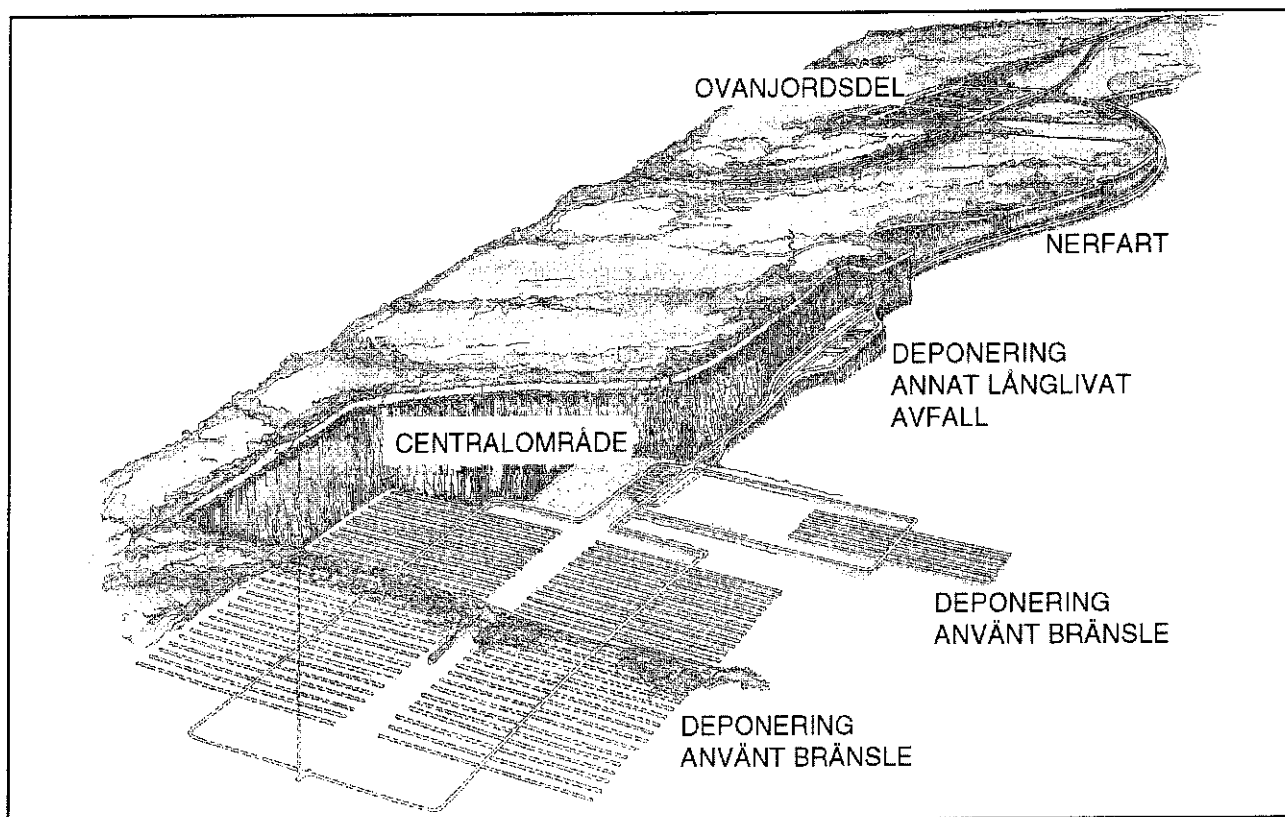
Slutförvaring av långlivat låg- och medelaktivt avfall planeras ske i en särskild del av djupförvaret som placeras åtskild från förvarsdelarna med högaktivt avfall.

Eftersom det finns olika typer av låg- och medelaktivt avfall behövs tre förvarsutrymmen (benämnda SFL 3-5), se Figur 8-4, som konstrueras så att hänsyn tas till de olika avfallstypernas krav på hantering och deponering.

En avfallstyp utgörs av långlivat avfall från Studsvik. Hit räknas en del av det avfall som Studsvik samlar in från forskning (egen och extern), industri och medicin. Det här avfallet konditioneras vid behov och förpackas på Studsvik, se Figur 8-5. Här ingår också en del äldre redan tidigare förpackat avfall. Detta avfall kommer att sänkas ner i åtskilda fack i en underjordisk betongkonstruktion. Troligtvis kommer återstående mellanrum i facken att återfyllas med betong. Återfyllnadsmaterial i mellanrummet mellan berget och betongkonstruktionerna kan exempelvis vara sand, bergkross eller bentonit. I betongkonstruktionen deponeras även driftavfall från CLAB och inkapslingsanläggningen som uppkommer efter att SFR stängts. Det är således bara en del av detta avfall som kan betecknas som långlivat. En stor del utgörs av avfall av den typ som idag deponeras i slutförvaret för radioaktivt avfall (SFR).

En annan avfallstyp utgörs av härdkomponenter och interna delar från de kraftproducerande reaktorerna. Den består till största delen av rostfritt stål. Avsikten är att förpacka komponenterna i betongbehållare som även återfylls med betong. Avfallet deponeras i bergtrum med golv och väggar av betong. Bergtrummen återfylls sannolikt med sand eller bergkross.

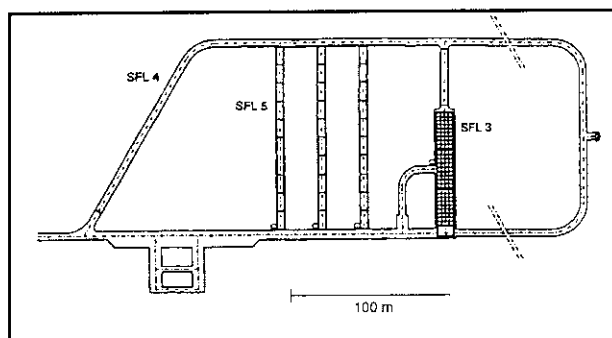
Rivningsavfall från CLAB och inkapslingsanläggningen liksom CLAB-kassetter (om de inte dekontamineras) och transportbehållare uppkommer mycket sent i programmet. Deponeringsutrymmen för dessa utgörs av de transporttunnlar och utrymmen som finns kvar efter stängning och förslutning av övriga förvarsdelar för låg och medelaktivt avfall.



Figur 8-3. Principiell utformning av djupförvaret.

Den totala volymen låg- och medelaktivt avfall som planeras till djupförvaret uppskattas till 25 000 m³. Till det långlivade avfallet räknas reaktorkomponenterna och mycket av Studsviksavfallet. Mer än halva volymen utgörs av driftavfall och rivningsavfall vilket i princip skulle kunna gå till slutförvaret SFR i Forsmark.

Avfall och avfallskollin finns beskrivna i en arbetsrapport från SKB /8-8/. Innehållet i arbetsrapporten finns sammanfattat i slutrapporten till förstudien av SFL 3-5 /8-9/. Utformningen av de olika förvarsutrymmena finns redovisad i SKBs Plan-rapporter /8-1/.



Figur 8-4. Översikt av SFL 3-5.

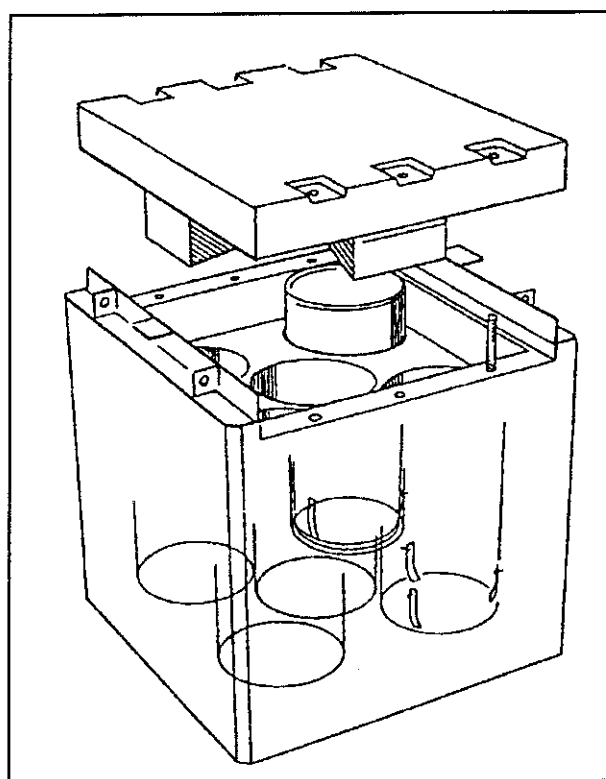


Figure 8-5. Förpackning av låg- och medelaktivt avfall på Studsvik. Fem stålfat med dubbellock (85 liter) placeras i fem hål i en container av betong (1,2x1,2x1,2 m).

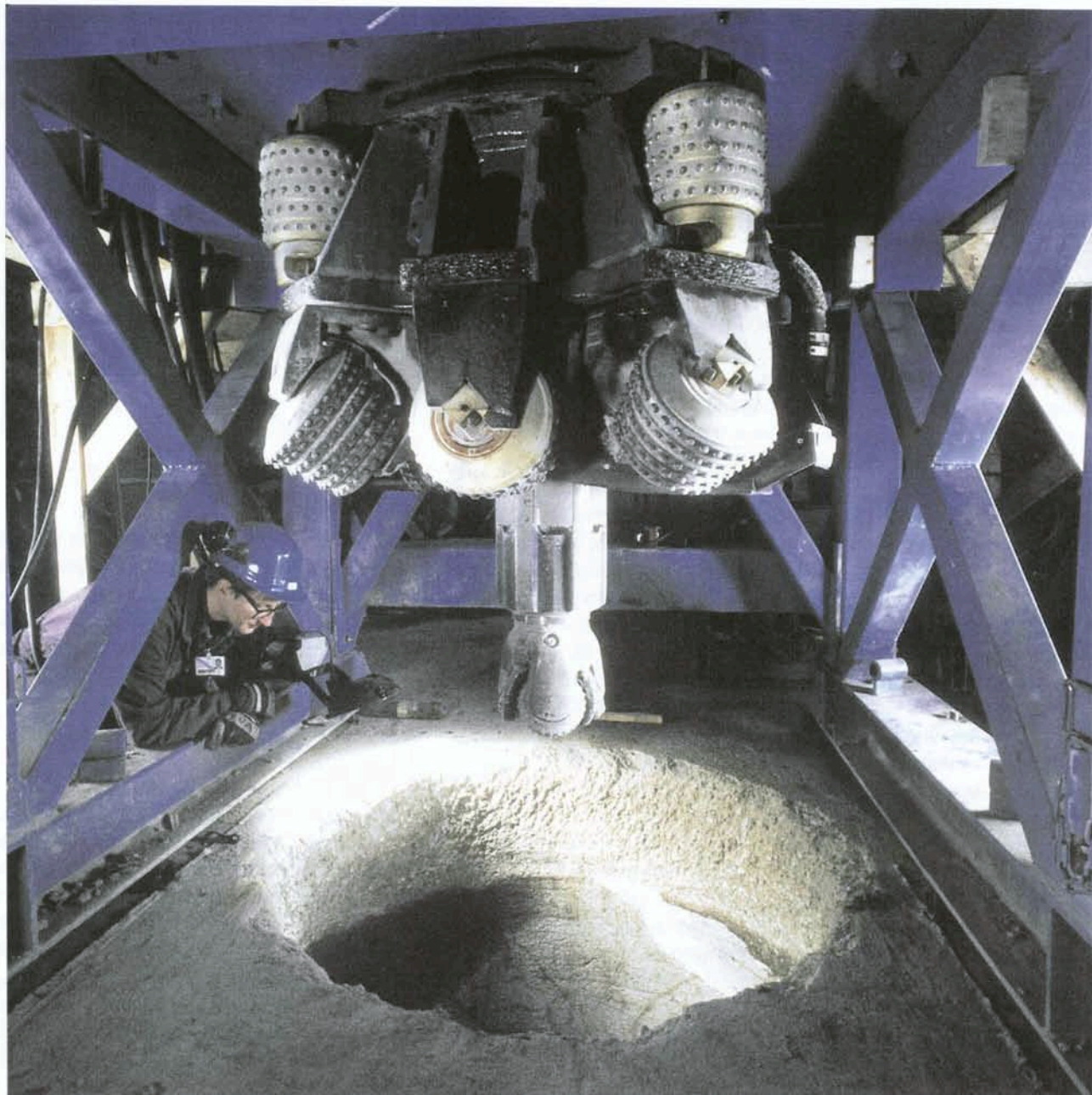
8.1.2 Byggmetoder

En allmän översyn av kunskapsläget beträffande byggmetoder görs varje år som en del i PLAN-arbetet /8-10/. Allmänt kan konstateras att de olika sätt att bygga i berg som kan komma till användning i djupförvaret är väl kända. Däremot finns kunskapsluckor beträffande olika byggmetoders för- och nackdelar med avseende på förvarets funktion efter förslutning.

Senast har två prov med mekaniserad brytning (tunnelborrning med TBM-metoden och schaktkorrning med stigortsborrningsteknik) påvisat möjligheterna med den modernaste tekniken för hårt, kristallint berg /8-11/. Ett

prov vid Äspö gav erfarenhet från fullborrning på förvarsdjup och i lutning samt bekräftade den förväntade minskningen av mängden bergförstärkning jämfört med konventionell tunneldrivning. Det andra provet med fullborrning av deponeringshål bekräftade att s k omvänd stigortsborrningsmetodik med fördel kan användas för borrning av deponeringshål, se Figur 8-6. Borrkaxet avlägsnas torrt från borrhålet med hjälp av vakuumsugning.

Värdering och val mellan tunneldrivningsmetoder kommer att stå mellan bland annat den nytta som TBM-tekniken troligen medför i fråga om mindre förstärkningsinsatser med den nackdel som den större tunnel-



Figur 8-6. Provbörning av deponeringshål. På bilden syns borrkrona samt överdelen på ett borrhål med diameter på 1,5 m.

arean medför. Den sistnämnda är en följd av den runda tvärsektionen.

En i detta sammanhang betydelsefull fråga är användning och kontroll av injekteringsmedel för tätning mot vatteninflöden. Oavsett om en stor eller liten diskontinuitet skall tätas erfordras god kunskap om berget, injekteringsmedlet och injekteringstekniken för att ett gott injekteringsresultat skall kunna uppnås. Komplexiteten i denna problematik har inneburit att praktiska injekteringsarbeten i huvudsak baseras på erfarenheter och i liten utsträckning på teoretiska kunskaper.

Det är idag möjligt att delvis beskriva injekteringsförloppet i en bergmassa bl a på basis av undersökningar och experiment i Stripaprojektet /8-12/ och Äspölaboratoriet /8-13/. Flera väsentliga faktorer återstår emellertid att undersöka innan injekteringsförlopp kan beskrivas mera noggrant. Sådan utveckling beskrivs närmare i kapitel 9.

8.1.3 Teknik för deponering

Referenskonceptet för deponering från FUD-program 92 är oförändrat. I korthet innebär detta att kapslarna med det använda kärnbränslet transporteras ner under jord i transportbehållare. Där överförs kapseln till en deponeringsmaskin som kör kapseln fram till aktuellt deponeringshål och sänker ner den. Innan dess har hålet klätts med block av högkompakterad bentonit och ett inre utrymme lämnats för kapseln. När kapseln är på plats läggs bentonitblock över kapseln och hålet fylls ut med en blandning av sand eller bergkross och bentonit. Samma material används sedan för återfyllning av hela deponeringstunneln.

Blocken av högkompakterad bentonit kring kapslarna förutsätts kunna framställas i form av "ananasringar", om sådana visar sig vara ändamålsenliga att hantera under deponeringen. Två olika metoder för pressning har provats: isostatisk pressning och axiell pressning. Den isostatiska metoden tillämpades för fabricering av block för försök i Stripa. Kunskapsläget för metoden med axiell pressning är att 10-20 kg tunga block nu kan produceras med hjälp av samma teknik som används för pressning av elfast tegel /8-14/. Tekniken bygger på en hög presshastighet vilket kräver ett grovkornigt bentonitmaterial. I dagens läge kan block som är lämpliga för manuell applicering i KBS-3-hål tillverkas med en torrdensitet inom området $1.7-1.9 \text{ g/cm}^3$ och med en vattenmättnadsgrad av 50-85% /8-14/. Med måttliga spalter i deponeringshålet för att få rum att bygga upp bentonitbufferten och för att klara isättningen av kapseln är denna blockkvalitet tillräcklig för att resultera i en täthet hos bufferten på ca $2,0 \text{ g/cm}^3$ i vattenmättat och utsvällt tillstånd. Buffertegenskaperna hos blocken är lika goda som hos block som pressats av bentonitpulver.

För återfyllnad av tunnlar och bergrum studeras bergkross som ballastmaterial i stället för sand med rundade korn som var huvudalternativet i KBS-3-rapporten.

Preliminära resultat tyder på att en lämplig blandning vid återfyllning kan vara 10-20% bentonit och krossat berg. Blandningen läggs ut i skikt och kompakteras med vibrovält respektive med vibrerande verktyg överst mot taket. Detta material beräknas efter vattenmättnad få en hydraulisk konduktivitet på mindre än 10^{-9} m/s , vilket är i nivå med den hos mycket tätt berg /8-15/.

Alternativa återfyllningsmaterial som studeras är krossat berg eller morän utan bentonit som också läggs ut i lager och kompakteras på platsen. Dessa materials hydrauliska konduktivitet kommer emellertid efter kompaktering att vara högre än den för bra berg /8-16/ men andra faktorer kan vara fördelaktiga.

Under deponeringen av en kapsel kan man inte utesluta missöden som kräver någon form av åtgärd. Vanligen torde felet kunna avhjälpas och deponeringen fortsätta, men det är också tänkbart att felet inte kan avhjälpas med mindre än att kapseln först måste tas bort. Därför ingår möjligheten till reversering av deponeringsprocessen som en av flera funktioner i konstruktion och utprovning av deponeringsutrustningen.

Kollin med annat långlivat avfall transporteras ner under jord i sina transportbehållare och deponeras i bergrum med samma metod som används i SFR och med motsvarande utrustning. Då erfarenheterna därifrån är goda studeras inte någon alternativ metod.

Den allmänna bedömningen är att den utrustning som behövs för deponering av kapslar och kollin kan byggas med beprövade komponenter och utprovas på vedertaget sätt.

8.1.4 Förslutning, återtag och övervakning

Förvaret skall utformas så att det är säkert under mycket lång tid även om övervakning och kontroll upphör efter förslutning. Detta kan åstadkommas bl a genom att tunnlar och schakt återfylls och pluggas igen. Efter förslutning återställs platsen så långt det är lämpligt till de förhållanden som rådde före etableringen.

Förslutning

Efter deponeringen av kapslar med använt kärnbränsle återfylls deponeringstunneln med en blandning av bentonit och ballastmaterial och temporära väggar sätts upp i tunnelmynningen. När samtliga kapslar deponerats kan de temporära väggarna rivas och transporttunnlarna återfyllas. Återfyllningen syftar till att begränsa möjliga transportvägar för grundvatten. En särskild utredning har belyst tekniska möjligheter av att hålla deponeringstunnlarna öppna under olika tidsperioder /8-17/. Slutsatsen är att det av tekniska skäl är lämpligt att återfylla och försluta deponeringstunnlarna i ett tidigt skede.

Pluggar sätts vid sprickzoner och på andra ställen för att ytterligare förhindra eller starkt begränsa vattenströmning i tunnlar men även i berget närmast tunn-

larna (störda zonen). Även borrhål skall pluggas. Lösningar för hur pluggarna kan utformas har redovisats i bland annat FUD-program 92. Metoder för pluggning av tunnlar och borrhål har provats bl a i Stripa (tunnlar och borrhål), Ranstadsverket och SFR (borrhål).

Återtag

Metod och utrustning utvecklas även för återtag efter det att kapseln har deponerats och deponeringstunneln återfyllts. Detta för att skapa en beredskap för ett återtag om sådan av något skäl blir aktuell. Som tidigare nämnts är därför bl a möjligheten till reversering av deponeringsprocessen en av flera funktioner som ingår i konstruktion och utprovning av deponeringsutrustningen.

Övervakning

Under hela den tid som djupförvaret är i drift finns en organisation på platsen för liknande typ av anläggningsövervakning som vid andra kärntekniska anläggningar. För kapslar som deponeras under den inledande driften kommer det att finnas program för att mäta olika förhållanden (tryck, temperatur, fukthalt, eventuell strålnivå, etc) i deponeringshål och i deponeringstunnlar. Detaljerna i ett sådant program kommer att utarbetas i den fortsatta planeringen och baseras bl a på de erfarenheter som erhålls vid försöken i Äspölaboratoriet. Schakt, tillfartstunnlar och allmänna utrymmen i djupförvaret hålls givetvis öppna och tillgängliga under hela driftperioden. Innan förvaret försluts har man sålunda kunnat observera de först deponerade kapslarna under flera decennier och därmed försäkrat sig om att allt fungerar på avsett sätt. Man kan även ta upp de först deponerade kapslarna och inspektera dem om man önskar sig ytterligare verifikation.

När allt avfall deponerats kan den generation som då ansvarar för anläggningen besluta om hur man skall förfara beträffande förslutning och framtida övervakning. I det program som SKB nu bedriver ingår, som framgått ovan, att utarbeta metoder för hur en fullständig återfyllning och förslutning av förvaret kan göras. Vilken typ av övervakning som skall ske av djupförvaret och platsen på lång sikt är i första hand en fråga för varje framtida generation för sig. Det som nu kan göras är att ange och beskriva de tekniska möjligheterna för övervakning av platsen och förhållandena i och i närheten av djupförvaret. I det sammanhanget måste man analysera vilken effekt övervakningsåtgärder kan ha på såväl kort-siktig som långsiktig säkerhet.

8.1.5 Arbetsmiljö

En inledande studie rörande radiologisk arbetsmiljö i djupförvaret har genomförts i samband med förstudien i Storumän /8-18/. Allmänt konstateras att alla typer av arbetsuppgifter som kommer att finnas i djupförvaret och längs transportvägen från inkapslingsanläggning och

kusthamn förekommer redan idag i olika, industriella sammanhang.

Verksamheten vid djupförvaret kommer inledningsvis att domineras av bergarbeten som arbetsmiljömässigt kan jämföras med tillredningsfasen i en gruva. Även när deponeringen av kapslar har kommit i gång kommer bergarbeten att pågå i samband med att underjordsdelen successivt byggs ut. Arbetsmiljön i de delar av anläggningen där bergarbeten inte pågår kan jämföras med miljön i kraftstationer och liknande undermarksanläggningar.

Anläggningsarbete under jord medför erfarenhetsmässigt större risker för arbetsskador än vad många andra industrimiljöer uppvisar. Mycket kan göras – och har under senare år gjorts – för att nedbringa dessa risker. Teknikförbättringar, strikta säkerhetsrutiner och en god erfarenhetsåterföring är exempel på viktiga komponenter i skyddsarbetet. Djupförvarets anläggningar kommer att utformas med hänsyn till detta. Detsamma gäller genomförandet av anläggningsarbetena.

Övervakningen av den radiologiska arbetsmiljön i samband med transporter och hantering vid djupförvaret kommer att följa gängse standard för kärnteknisk verksamhet. Den grundläggande principen är att strålskyddet skall vara optimerat och att individens skydd skall vara säkerställt genom dosgränser. Med optimering menas att alla åtgärder som är försvarbara med hänsyn till kostnader och sociala faktorer skall vidtas för att minska den totala stråldosen. Därvid kan även människors upplevda oro för riskerna med avfallet beaktas.

Vid transporter från inkapsling till djupförvar är kapslarna med använt bränsle inneslutna i transportbehållare med ett par decimeter tjocka stålväggar. Transportbehållarnas huvudsakliga uppgift är att skärma av strålningen från kapslarna så att behållarna kan hanteras utan fara för transportpersonalen. Behållarna ger också ett mekaniskt skydd som hindrar att kapslarna skadas under transporten. Transportbehållarna förblir hermetiskt tillslutna tills dess att de har nått deponeringsnivån i djupförvaret. I mynningen till deponeringstunneln ansluts en deponeringsmaskin med vars hjälp transportbehållarnas lock öppnas och kapseln tas ut för vidare befordran till sitt deponeringshål. Ett fåtal personer kommer att vara sysselsatta med detta arbete. Av dem som arbetar vid djupförvaret är det endast denna personalkategori som kan förväntas erhålla mätbara dostillskott från avfallet som deponeras. Omfattande åtgärder görs för att minimera stråldoserna till personalen. Utrustningen kommer att avståndsmanövreras eller vara försedd med strålskärmar, vilket innebär att personalen inte kommer i direktkontakt med kapslarna.

Dostillskottet måste givetvis begränsas i överensstämmelse med SSIs riktlinjer för personer som arbetar med joniserande strålning. I praktiken kan antas att doserna blir betydligt lägre än de maximala värden som beräknas i konstruktionsskedet. Exempelvis visar erfarenheter från SFR i Forsmark att stråldoserna är tio gånger lägre än de som maximalt antogs vid förvarets idrifttagning /8-18/.

Eftersom djupförvaret är en berganläggning finns det en annan källa som kan ge bestrålning, nämligen den radongas som frigörs från själva berggrunden. Till skillnad från strålningen från avfallet, som bara berör den personal som arbetar med hantering och deponering, utsätts all personal som arbetar under jord för radon. Idag är gränsvärdet för radon $2\ 000\ \text{Bq/m}^3$ i anläggningar under jord (arbetsplats för $2\ 000$ timmar/år). I framtiden är det troligt att gränsvärdet kommer att sättas till $200\ \text{Bq/m}^3$ radon i luften, oavsett om arbetsplatsen ligger ovan jord eller under jord. För att uppnå detta i en uranrik berggrund krävs omfattande tekniska åtgärder bland annat rörande ventilationen.

Sammanfattningsvis konstateras att hanteringen vid djupförvaret kan utformas med höga krav på en god arbetsmiljö. Personaldoserna kan hållas långt under gällande gränsvärden. Delar av anläggningen kommer att zonindelas beroende på strålningsnivå. Dosimetri kommer att införas. Ingen luftburen aktivitet (utom radon från berget) eller ytkontaminering kommer att finnas.

8.1.6 Fysiskt skydd och safeguards

Sverige har genom internationella överenskommelser, t ex icke-spridningsavtalet, Euratomfördraget, och flera bilaterala avtal, förbundit sig att använda kärnämnen enbart för fredligt bruk, samt åtagit sig att redovisa all hantering av kärnämnen. Häri ingår även använt kärnbränsle. För att säkerställa att bränslet används på avsett sätt är all hantering omgärdad av fysiskt skydd och safeguards. Det fysiska skyddet omfattar den bevakning och andra åtgärder som vidtas för att skydda bränslet från stöld eller yttre åverkan. Safeguardsåtgärderna som utövas av SKI, IAEA och Euratom syftar till att säkerställa att bränsle inte förs undan för användning som kärnvapen.

Genom safeguardsåtgärder i anslutning till CLAB, inkapslingsanläggningen och transporter till djupförvaret skall kunskap föreligga om vilket bränsle som place-rats i varje kapsel. Vid djupförvaret återstår att förvissa sig om att rätt kapsel mottas samt att kontrollera att den deponeras och förblir i djupförvaret.

För hantering av använt bränsle vid kärnkraftverken och i CLAB finns en väl etablerad safeguardspolicy. Den innefattar dokumentation av alla åtgärder som genomförs samt frekventa och ibland oanmälda kontroller av tjänstemän från IAEA och Euratom. Kontrollen underlättas av att bränslet vid varje tidpunkt är åtkomligt för direkt verifiering och mätning. I och med inkapsling av bränslet försämras möjligheterna att direkt mäta de enskilda bränsleelement som finns i kapseln. Safeguardsåtgärderna får därför i första hand baseras på identifiering av kapslarna och på obruten kunskap om hanteringen av kapslarna.

För inkapslingsanläggningen bedöms huvudsakligen befintlig safeguardsteknik kunna användas. Visst utvecklingsarbete kan dock behövas, främst vad gäller entydig identifikation av kapslar.

Vad gäller djupförvaring uppstår en del nya frågeställningar, som dels är kopplade till att kapslarna inte är tillgängliga för direkt identifiering, dels till tidsperspektivet för djupförvaringen.

IAEA arrangerade 1988 ett konsultmöte för kring dessa frågor. Vid mötet drogs slutsatsen att använt bränsle i ett djupförvar förblir åtkomligt, vilket innebär att det även framledes behöver stå under safeguards. Omfattningen av behövliga safeguardsåtgärder diskuterades dock inte. Nyligen har IAEA tagit initiativ till att ta fram underlag för att utarbeta en safeguardspolicy för djupförvaring av använt kärnbränsle. Underlaget tas fram inom ett stödprogram benämnt SAGOR (Safeguards for Final Disposal of Spent Fuel in geological Repositories). Arbetet påbörjades 1994 och är prioriterat inom IAEA. Från Sverige deltar experter från SKI och SKB. Arbetet förväntas vara klart 1996-97 och resultera i ett förslag till safeguardspolicy för djupförvar.

Allmänt kan konstateras att inkapslat använt bränsle deponerat i ett djupförvar på 500 m djup är svårtillgängligt och att de åtgärder som skulle behövas för att återta det och därefter upparbeta det för att framställa plutonium är omfattande, tidskrävande och dyra. Plutonium i använt bränsle har dessutom en sammansättning som gör det olämpligt för vapenändamål. Sammantaget innebär detta att kraven på safeguards av djupförvaret bör kunna vara begränsade i långtidsperspektivet.

För att minska risken för oavsiktligt mänskligt intrång i ett förvar för radioaktivt avfall bör man på bästa möjliga sätt försöka bevara informationen om sådana förvar till kommande generationer. Om information finns tillgänglig ges även framtida generationer möjlighet att ha ett underlag för sina beslut rörande eventuella förändringar av eller i förvaret.

För att få bästa möjliga livslängd på informationen rörande djupförvar bör den viktiga informationen (källtermsdata, geografisk läge, förvarets design samt underlagsmaterial för säkerhetsanalysen) arkiveras på långtidsbeständigt medium. Denna information bör finnas på ett flertal arkiv (lokalt, regionalt, nationellt och internationellt). Dessa slutsatser har sammanställts i en nordisk rapport 1993 /8-19/

8.1.7 Förvarsdjupets inverkan på förvarsfunktionen

I sina kommentarer till FUD-program 92 efterlyste SKI en systematisk genomgång av hur förvarsdjupet påverkar förvarsfunktionen av ett KBS-3-förvar. En sådan genomgång redovisas i /8-20/. Denna studie beaktar djup ner till 2 000 m, vilket ligger inom gränsen för vad som kan definieras som "gruvdjup", och beskriver de trender olika faktorer kan förväntas uppvisa vid förändring av djupet. På stort djup, d v s 1000 till 2000 m, är de viktigaste positiva faktorerna:

- lägre grundvattenflöde (på grund av lägre vattengenomsläpplighet, lägre hydraulisk gradient och

högre salinitet) och därmed reducerad tillförsel av korroderanter och reducerad urlakning av radionuklider vid eventuellt kapselbrott,

- längre transportväg och längre transporttid för radionuklider,
- reducerad påverkan av glaciation och permafrost,
- reducerad risk för mänskligt intrång,

medan de viktigaste negativa faktorerna är:

- reducerad byggbarhet på grund av högre bergspänningar och högre vattentryck,
- större svårigheter med geologisk och hydraulisk beskrivning av aktuella bergvolymmer,
- försämrad buffertverkan till följd av ökande salthalt i grundvattnet,
- större grad av osäkerhet och ökad risk för oväntade händelser i samband med byggande och drift.

På stort djup blir bergspänningarna ogynnsamma för ett KBS-3-liknande förvar vilket förmodligen kräver övergång till deponering av kapslar i rad i tunnlar. Temperaturen ökar med djupet vilket leder till att avfallet måste spridas ut över en större bergvolym för att inte den uppsatta maximitemperaturen skall överskridas. Sammanfattningsvis konstateras att de fördelar som uppnås med djupare förläggning av djupförvaret inte uppväger de växande svårigheter som uppstår.

8.1.8 Miljöeffekter

När en platsundersökning startar skall en plan upprättas över vad som skall ingå i en miljökonsekvensbeskrivning. Denna skall tas fram tillsammans med berörda kommuner, myndigheter m fl (MKB-process).

I samband med förstudien i Storuman har genomförts en orienterande studie över vilka tänkbara effekter på markanvändning och miljö som kan bli följden av djupförvarets utbyggnad, drift och förslutning /8-21/. Resultaten är till stora delar generella och oberoende av var i Sverige djupförvaret lokaliseras.

Miljöutredningen i Storuman har redovisat vad ett djupförvar betyder för:

- inverkan på markanvändning, natur- och kulturmiljö,
- utsläpp till luft, buller och vibrationer,
- olyckor och brand,
- inverkan på vattnet,
- inverkan på flora och fauna,
- hushållning med naturresurser,
- återställande.

Sammanfattningsvis konstateras att djupförvaret kan utformas så att den ger en liten miljöpåverkan jämfört med vad som normalt förekommer i industriella sammanhang. Någon industriprocess förekommer inte, kemikalier förekommer sparsamt och återfyllnadsmate-

rialen kvartsand (eller bergkross) och bentonitlera innehåller inga miljöstörande ämnen. Vid undersökningar, bygge och drift av anläggningen kan en viss grundvattenavsänkning ske på platsen på samma sätt som vid gruvor. Den mest påtagliga miljöpåverkan kan komma att bli upplagen för bergmassor samt eventuellt byggen av järnväg eller väg fram till förvarsplatsen. Bergmassor bör därför så långt möjligt återanvändas. Placeringen i terrängen av anläggningen och eventuell järnväg/väg måste göras så att inverkan på miljö, friluftsliv, näringsverksamhet, jakt och fiske blir liten.

8.1.9 Samhälleliga effekter av djupförvaret

Etablering och drift av ett djupförvar kommer att på olika sätt påverka orten och regionen. Djupförvaret innebär arbetstillfällen, befolkningstillskott, stöd för infrastrukturen och nya möjligheter för lokalt näringsliv. Det innebär emellertid också något obekant nytt som kan upplevas som ett hot och skapa oro.

I förstudierna för Storuman och Malå har även samhälleliga effekter av ett djupförvar studerats. Utredningar har redogjort för omfattning av direkta och indirekta arbetstillfällen /8-22, 23, 24, 25/, psykosociala effekter /8-22/, inverkan på turism /8-26, 27/ och friluftsliv /8-28/ samt erfarenheter från lokaliseringar av andra anläggningar av i någon mån liknande karaktär /8-29/ (kärnkraftverk, SAKAB, oljeraffinaderi, gruvor).

Ett djupförvar vid full drift skulle motsvara ca 200 direkta och drygt 100 indirekta arbetstillfällen. Befolkningsökningen till följd av djupförvaret skulle i genomsnitt bli ca 500 personer, enligt en prognos från Umeå universitet /8-22/. Enligt samma studie skulle drygt 30% eller ca 5 miljarder kronor av den totala kostnaden på 15 miljarder kunna absorberas lokalt och i den omgivande regionen.

Hur sysselsättningen varierar under djupförvarets utbyggnad och drift, vilken typ av arbetskraft som kommer att efterfrågas och hur personalen skall rekryteras har också beskrivits i samband med förstudierna /8-22, 23/.

Förväntad sysselsättning baseras på en relativt god uppfattning om omfattningen av det framtida djupförvaret. För andra samhälleliga konsekvenser, exempelvis inverkan på turismen eller psykosociala effekter är underlaget osäkert. Man kan utnyttja erfarenheter från lokalisering av andra liknande anläggningar eller bedömningar baserade på utvecklingstendenser vid olika förutsättningar /8-26, 27/. Det är dock ofrånkomligt att slutsatserna för dessa och liknade frågor är präglade av subjektiva bedömningar och värderingar /8-30/.

Vid en lokalisering av ett djupförvar till andra platser i Sverige är det troligt att effekterna på sysselsättning och befolkning blir ungefär som uppskattat för Storuman och Malå. Möjligen kan en lokalisering i direkt anslutning till befintlig kärnteknisk verksamhet eller till annan större industri i någon mån modifiera personalbehovet efter-

som där kan samordning minska behovet av vissa personalgrupper.

8.2 UNDERSÖKNING OCH UTVÄRDERING AV PLATSER

Uppfattningen om att det radioaktiva avfallet kan slutförvaras på ett säkert sätt i svenskt urberg baseras på kunskaper om avfallets egenskaper, de tekniska barriärernas egenskaper och funktion och det omgivande bergets egenskaper. Bergets viktigaste egenskaper i detta sammanhang är att det medger:

- kemiskt gynnsam miljö,
- mekaniskt stabil miljö,
- fördröjd transport av nuklider,
- hinder för mänskligt intrång.

Även om berggrunden generellt sätt medger bra förhållanden för ett djupförvar är det de lokala förhållandena i berggrunden som avgör en plats lämplighet. I FUD-program 92, kompletterande redovisning /8-31/ beskrivs de geologiska kriterier som är viktiga för ett djupförvars funktion. SKB avser att innan platsundersökningar startar presentera ett undersökningsprogram som bl a skall redogöra för hur väsentlig information om dessa kriterier kan erhållas. Nyckelfrågor vid utformningen av programmet är:

- vilka är erfarenheterna från svenska och utländska platsundersökningar?
- vilken kunskap (data) behövs om platsen och berggrunden för att genomföra projektering och säkerhetsanalyser och miljökonsekvensbeskrivningar?
- vilka undersökningsmetoder och instrument skall användas?
- hur skall datahanteringen och bearbetningen ske?
- vilka rutiner och kvalitetsprogram skall finnas?

8.2.1 Erfarenheter från platsundersökningar

I syfte att sammanfatta resultaten från typområdesundersökningarna publicerades under 1991 sammanställningsrapporter för de flesta områdena /8-32-37/. En sammanfattande utvärdering och redovisning av erfarenheter från dessa undersökningarna är för närvarande under framtagning.

Metodik och erfarenheter från utlandet tas tillvara på olika vis. Bland annat har SKB beställt sammanfattande erfarenhetsrapporter från de platsundersökningar som genomförs i Kanada och Finland /8-38, 39/. Dessa länder har kärnavfallsprogram som liknar det svenska och likartade geologiska förhållanden med urberg som huvudkandidat för sitt djupförvar.

I Kanada har AECL genomfört geologiska undersökningar sedan 1970-talet i syfte att undersöka förhållandena i den kanadensiska berggrunden. Man har undersökt ett antal graniter, gnejser och en gabbro. Den senaste tio-årsperioden har den geovetenskapliga undersökningsverksamheten huvudsakligen koncentrerats till Whiteshell i mellersta Kanada där ett underjordiskt forskningslaboratorium, URL, har etablerats. Erfarenheter som kan vara av betydelse för det svenska platsundersökningsprogrammet har publicerats i /8-38/. AECL publicerade 1994 en omfattande MKB-utredning över Kanadas koncept för slutförvaring av kärnavfall. En av underlagsrapporterna ger en utförlig beskrivning av det geovetenskapliga underlaget och hur platsundersökningar och platsval ska genomföras /8-40/.

I Finland har TVO sedan mitten av 1980-talet genomfört platsundersökningar på fem ställen. Samlade erfarenheter från dessa beskrivs i /8-39/. Målet är att vid inledningen av nästa sekel påbörja vad som i SKB sammanhang kallas detaljundersökningar, d v s byggande av undersökningstunnlar och/eller schakt, på en plats. Preliminära platsundersökningar har genomförts på fem platser och för närvarande pågår kompletterande platsundersökningar på tre platser.

Omfattande arbeten med att utforma och tillämpa metoder för platsundersökningar har genomförts i Stripa-projektet 1980-1992 /8-41, 42/ och i Äspölaboratoriet. Resultat från den sistnämnda redovisas nedan.

Sammanfattningsvis finns det en omfattande erfarenhet av platsundersökningar både i Sverige och utomlands som kan ligga till grund vid utformningen av SKBs platsundersökningsprogram. Andra viktiga hänsyn är anpassning till de kriterier som skall ligga till grund för en bedömning av platsens lämplighet samt anpassning av programmet till de lokala geologiska förhållandena.

8.2.2 Erfarenheter från Äspölaboratoriet

En viktig del i verksamheten vid Äspölaboratoriet under tiden 1986 - 1994, har varit att pröva och utveckla metodik för plats- och detaljundersökningar. Ett av syftena har varit att studera i vad mån undersökningar från markytan och i borrhål förmår att beskriva förhållanden på 500 m djup av betydelse för säkerheten. Förundersökningsetappen (platsundersökningar) avslutades hösten 1990 /8-43, 44/. En utvärdering av de använda undersökningsmetoderna och deras praktiska tillämpning har publicerats /8-45/.

En strategi för platsundersökningarna och uppföljningen av dessa redovisades i /8-46/. På basis av platsundersökningarna upprättades ett flertal modeller av berggrunden runt Äspö. Dessa omfattade t ex, bergarter, geologiska strukturer, grundvattenkemi, geohydrologi och mekanisk stabilitet /8-44/. För att pröva modellerna upprättades också detaljerade prognoser av de förväntade data som skulle samlas in under det att anläggningen byggdes /8-47/.

Den slutliga utvärderingen av resultaten från Äspöundersökningarna och tillförlitligheten i gjorda prediktioner kommer i sin huvudsak att rapporteras under 1996, men följande preliminära slutsatser har redovisats /8-48/ och sammanfattas nedan:

Existens/avsaknad av processer, strukturer och geologiska fenomen och geometrisk beskrivning

- De bergarter som identifierades vid platsundersökningarna har påträffats under anläggningsarbetena ner till 460 m djup. Inga andra bergarter har tillkommit eller saknats.
- Platsundersökningarna visade att de olika bergarterna på Äspö var mycket heterogent fördelade och ingen detaljerad rumslig fördelning redovisades av bergarterna. Heterogeniteten är nu ytterligare bekräftad.
- De stora sprickzoner, med mer än 5m bredd, som identifierades i platsundersökningarna har påträffats. Inga nya, okända stora sprickzoner har påträffats.
- Zonernas geometri har i huvudsak beskrivits korrekt. En zon av mindre betydelse för anläggningsverksamhet med komplicerad och varierad stupning visade sig stupa österut istället för västerut, som tolkningen var på basis av platsundersökningarna.
- Sammantaget har platsundersökningarna varit tillförlitliga för att beskriva geometriska fenomen.
- Med tillämpning av en speciellt framtagen nomenklatur för Säker, Trolig, Möjlig betraktades en flack sprickzon vara geohydrologiskt Trolig och geologiskt Möjlig. Denna zon har dock inte varit möjlig att påvisa.
- De mindre sprickzoner (bredd <5 m) i nordnordvästlig riktning som identifierades vara betydelsefulla vattenledare har bekräftats.
- Salt grundvatten förekommer i stort som väntat.
- Kemiundersökningarna har påvisat en ny process, som inte beaktats vid tolkningen av platsundersökningarna, nämligen bakteriell syre- och sulfatreduktion, se avsnitt 5.5.5.

Sammantaget har platsundersökningarna vid Äspö varit tillförlitliga för att påvisa existens/avsaknad av geologiska egenskaper, strukturer och kemisk-fysikaliska processer.

Parameteruppskattningar

Arbetet med att jämföra parametervärden upprättade efter platsundersökningar med parametervärden erhållna i samband med anläggningsarbetena pågår; de sista data som används för jämförelsen togs fram till sommaren 1995.

Preliminära slutsatser tyder på att geologiska och geohydrologiska egenskaper på basis av platsundersökningarna har bestämts med den noggrannhet som förutsetts vara möjlig. I tunneln har det mätts upp högre salthalter i grundvattnet än vad som förutsades i prediktionerna. Detta tyder på att grundvatten från större djup, där salthalterna är högre, har lyfts upp till tunneln snabbare än vad man bedömt. Avvikelsen kan bero på brister i data som använts vid modelleringen av det transienta förloppet i grundvattenregimen under byggtiden.

Övrigt

Förutom rent geovetenskapliga resultat har också andra resultat uppnåtts. Det praktiska arbetet med att genomföra ett flertal tekniska och vetenskapliga experiment i samordning med pågående anläggningsarbeten har givit ett ovärderligt kunnande. Här ingår praktisk mätteknik, datahantering, kvalitetsrutiner av allehanda slag innefattande bl a kvalitetskontroll, projektstyrning, dokumentation etc.

De resultat och erfarenheter som uppnåtts vid Äspö rörande plats- och detaljundersökningar har företrädesvis sammanställts i tekniska rapporter och arbetsrapporter. Slutrapportering kommer att ske under 1996. Äspöarbetena ger ett viktigt underlag för att uppnå hög kvalitet vid planering och genomförande av plats- och detaljundersökningar.

8.2.3 Data från platsundersökningar

En platsundersökning skall:

- leda till en geovetenskaplig förståelse av platsen och dess regionala omgivning med avseende på nuvarande tillstånd och naturligt pågående processer,
- ge erforderliga geovetenskapliga parameterdata för platsanpassad utformning av djupförvaret med dess tunnlar och schakt samt för analys av djupförvarets långsiktiga funktion och radiologiska säkerhet,
- ge övriga data av betydelse för en miljökonsekvensbeskrivning av djupförvaret inklusive dess transporter.

Data och resultat från platsundersökningen används således vid funktions- och säkerhetsanalyser för beräk-

ningar och beskrivningar av de naturliga och tekniska barriärernas funktion för ett djupförvar på den undersökta platsen. Viktiga faktorer är sådana som berör kemisk miljö, berggrundens stabilitet, förhållanden av betydelse för hur radionuklider kan röra sig genom berggrunden, risk för mänskligt intrång och biosfärsförhållanden. Data används även för modellering och utvärdering av den långsiktigt radiologiska säkerheten för djupförvaret för olika scenariefall och med alternativa modell- och parameterintervall. Se vidare i kapitel 10.

Vid projekteringsarbetet används platsdata för upprättandet av layouter för djupförvarets olika delar, med anpassning till platsens och berggrundens förhållanden. Viktiga data är bergart, sprickfrekvens, lägen och karaktärer på sprickzoner, vattenföring, storlek och orientering på bergspänningar och berggrundens mekaniska egenskaper. Vidare genomförs bygganalys, dvs beräkningar och analyser av bergets egenskaper och begränsningar m a p byggt teknik och arbetarskydd.

Data från regionen används för att föreslå och analysera alternativa transportvägar och transportsätt för det radioaktiva avfallet och återfyllnadsmaterialet.

Platsval och utformning av anläggningarna skall göras så att konflikter med konkurrerande intressen minimeras. Hänsyn skall därvid tas till natur, miljö, kulturminnen, rekreation, jakt, fiske, övrigt friluftsliv, viktiga naturtillgångar, jord- och skogsbruk, befintlig och planerad markanvändning. Översiktliga data rörande dessa förhållanden tas fram och analyseras i förstudier. Vid en platsundersökning görs fördjupade studier rörande ovan nämnda förhållanden inklusive inventeringar av fauna och flora i intressanta områden. Analyser av data redovisas i en miljökonsekvensbeskrivning. I avsnitt 3.4 redovisas hur processen med att ta fram denna kan utformas.

8.2.4 Metod- och instrumentutveckling

Parallellt med framtagning av platsundersökningsprogram har det pågått utveckling av ny mätteknik liksom modifiering eller anpassning av befintlig sådan /8-49, 50/. I det följande beskrivs den utveckling som har gjorts under de senaste åren.

Värt att poängtera är de erfarenheter och den utvärdering av undersökningsmetoder som erhållits och gjorts inom Äspöprojektet /8-45/. Den grundläggande slutsatsen är att SKB har tillgång till väl beprövad teknik och kunnande, vilket är betryggande för kommande platsundersökningar. På några områden pågår dock ytterligare utveckling.

Ett viktigt område där framsteg gjorts är reflektionsseismik. Användbarheten av denna metod för att undersöka urberget ner till förvarsdjup var tidigare oklar. Samtidigt har det funnits ett behov av en metod som klarar av att identifiera horisontella sprickzoner och bergartskontakter, vilket har motiverat vidare utveckling av metoden. SKB har låtit bearbeta tidigare genomförda mätningar vid Finnsjön med förbättrade tolkningsmeto-

der och med gott resultat samt utarbetat strategier för hur metoden ska kunna optimeras för avsett ändamål /8-51/. Metoden bör dock provas i full skala innan den tillämpas vid platsundersökningar.

Möjligheten att orientera sprickor i borrhål har tagit ett stort steg framåt med införskaffandet av ett nytt borrhåls-TV-system. Systemet möjliggör den länge eftersökta presentationen av utfläta bilder av borrhålsväggen. Det kan användas ner till 1500 m djup i 56 mm borrhål (eller större). Bildkvaliteten är mycket bra och mjukvaran är kraftfull för bearbetning och beräkning av sprickorienteringar m m, se Figur 8-7.

Borringmetoder har, som tidigare rapporterats, utvecklats för att reducera den störning spolvattnet ger, framförallt på grundvattnets kemi. Svårigheter relaterade till borring genom kraftigt uppspruckna (och därmed instabila) partier med uppfyllande av kraven på minimal kemisk störning är ett område som arbetas vidare med för att finna olika lösningar.

En metod för längdkalibrering vid borrhålsmätningar är under utveckling. Den bygger på att kalibreringsringar borras in i borrhålsväggen i anslutning till borring och vid alla borrhålsmätningar kan sedan djupet kalibreras mot dessa kalibreringsringar med hjälp av en sensor som byggs in i respektive mätsond. Tekniken har provats med en prototyp ner till 400 m djup.

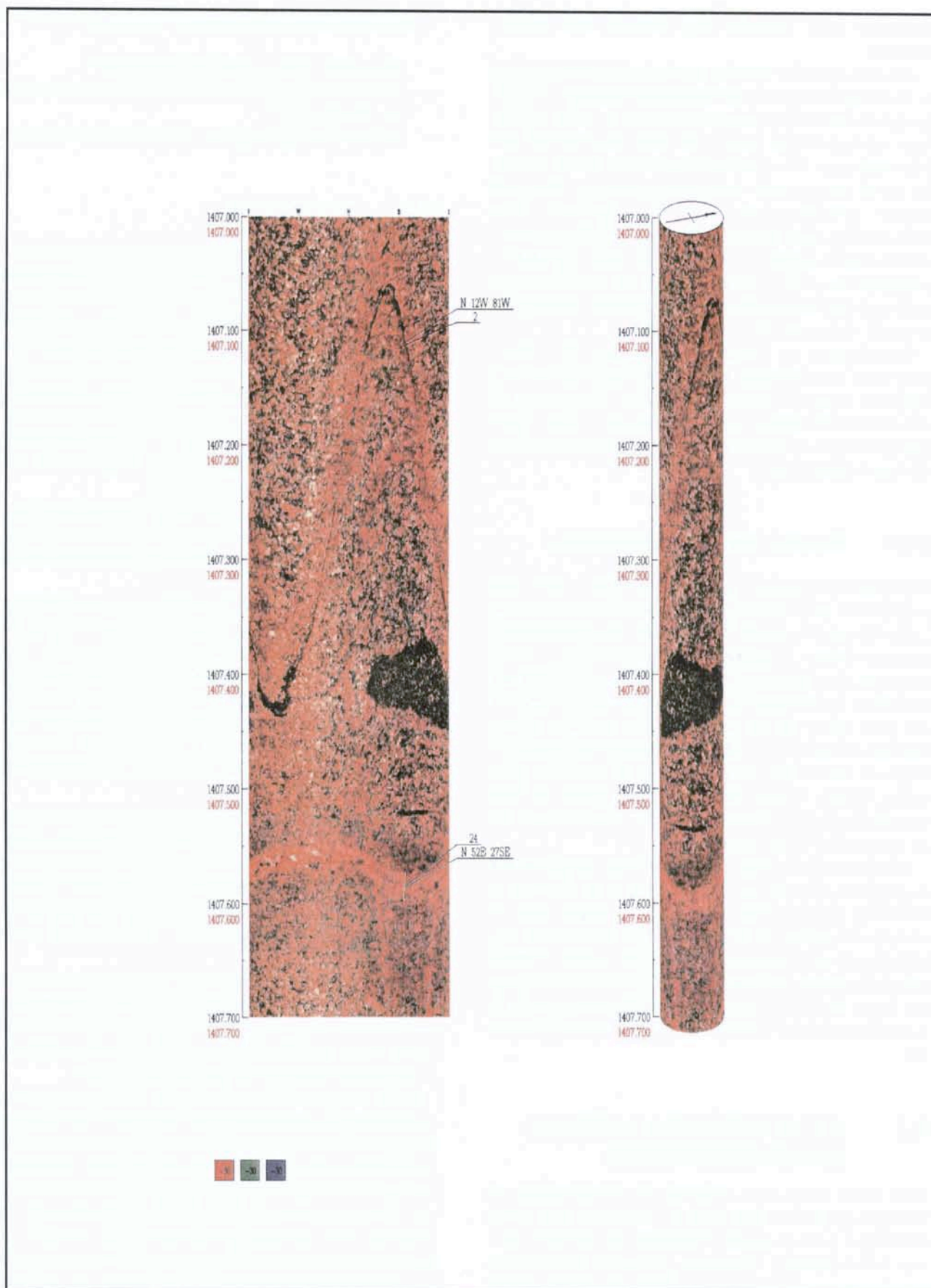
Beträffande borrhålsradarmetoden pågår utveckling av ytterligare en antenntyp, med högre frekvens, i syfte att få bättre upplösning, på bekostnad av mindre räckvidd. Den högre frekvensen torde även medföra bättre mätförutsättningar i lågresistiv miljö.

Erfarenheter och lärdomar om mätningar på större djup med olika metoder har erhållits och flera kommer att erhållas i SKBs 1700 m djupa hål KLX 02 vid Laxemar, se avsnitt 5.5.7. Beträffande borringens aktiviteter kan nämnas att utnyttjandet av wireline-teknik var av central betydelse för effektiv borring av ett djupt hål som detta. Erfarenheter från mätningar av olika parametrar under borring och vid de senare undersökningarna i borrhålet kommer att utnyttjas vid planeringen för djupa borrhål i platsundersökningarna. Bland annat kan nämnas att det mycket salta grundvattnet från 1100 m och neråt (8%) har inneburit förändringar i metodik för genomförande och utvärdering av hydrauliska tester.

Metodik för mätning av grundvattentryck och grundvattennivåer har utvecklats inom Äspö-projektet. Såväl för- och nackdelar finns med de metoder som används och innan något program upprättas för platsundersökningar kommer en grundlig utvärdering av erfarenheter från Äspö att göras.

8.2.5 Datahantering och databearbetning

SKB har sedan flera år samlat geologiska platsdata i en databas benämnd GEOTAB. Förändrade krav och nya tekniska möjligheter har motiverat en nyutveckling av databasen som givits namnet SICADA, där centrala krav är såväl effektiv inlagring som uttag av data samt att



Figur 8-7. Bild av borrhålsväggen på ca 1400 m djup erhållen från SKBs nya borrhåls TV-system.

databasen skall uppfylla höga kvalitets- och spårbarhetskrav.

Att göra modeller över hur en bergvolym är uppbyggd är en komplicerad och arbetskrävande process. Modelleringsarbetet innebär iterativ prövning av olika möjligheter till korrelation mellan data från olika borrhål och från markytan. För att effektivisera detta arbete utvecklas nu ett datorbaserat visualiseringsverktyg. Verktyget bygger i grunden på en 3-D CAD-programvara. Med detta verktyg skall nya borrhål och försvarslayouter successivt kunna läggas in och studeras under platsundersökningarnas olika skeden. Nyttan av visualiseringsverktyget för presentation av bergvolymens uppbyggnad är också viktig. Se även avsnitt 12.4.3.

Utvecklingen av visualiseringsverktyget går hand i hand med utvecklingen av ovannämnda databas så att effektiva länkar etableras däremellan. Även koppling mot SKBs GIS-databas där ytinformation i olika skalor lagras kommer att finnas så att dessa informationsmängder kan sambearbetas.

8.2.6 Rutiner och kvalitetsprogram

Platsundersökningarna måste genomföras med högt ställda krav på kvalitet. Förenklat innebär detta dels att "göra rätt saker" och dels "på rätt sätt". Att göra rätt saker hanteras främst i samband med upprättande av olika program, så att behov och uppsatta mål kan granskas och resultaten kontrolleras mot målen eller givna kriterier. Att göra saker på rätt sätt är främst en fråga om att utarbeta rutiner och se till att dessa följs vid genomförande av olika verksamheter. Vidare är kravet på spårbarhet viktigt. Detta uppfylls främst genom att följa upprättade rutiner. Den ovannämnda geo-databasen har en nyckelroll i detta sammanhang.

Administrativa rutiner för kontroll och godkännande av program, instruktioner, dataresultat m m, håller på att utvecklas. Kvalitetssäkringsfilosofin är att den som genomför ett arbete är bäst lämpad att kontrollera och bekräfta att det utförts enligt gällande rutiner. Arbetet kräver noggrann dokumentation. För närvarande planeras ingen separat kvalitetskontrollerande organisation. Kvalitetsrevisioner kommer att genomföras stickprovvis.

8.3 GENOMFÖRDA LOKALISERINGSSTUDIER

SKB avser att ta fram underlag för lokaliseringen av Sveriges djupförvar med hjälp av förstudier i fem till tio kommuner samt platsundersökningar av specifika platser i två kommuner. Dessutom genomförs översiktsstudier för att ge en allmän bakgrund av de grundläggande förutsättningarna över hela landet eller delar därav. Av detta underlag har en sammanfattande redovisning av översiktsstudierna genomförts /8-52/, liksom en förstudie /8-30/.

Nyckelfrågor vid lokalisering av ett djupförvar är:

- vilka krav ställs på en djupförvarsplats?
- vad är ett lämpligt förfarande (lokaliseringsprocess) för att välja plats?
- vilka är förutsättningarna i olika delar av Sverige?

8.3.1 Kort historik

Studier i syfte att bygga upp en omfattande allmän kunskap om det svenska urberget och de förhållanden där som kan påverka funktionen hos ett djupförvar inleddes för 20 år sedan d v s 1975 av den s k AKA-utredningen /8-53/. Sedan dess har ett omfattande arbete genomförts som har studerat processer och förhållanden som skulle kunna påverka funktionen av ett djupförvar. Exempel på sådana studier är: seismotektoniska förhållanden, postglaciala förkastningar, analyser av förutsättningarna i vissa bergarter, grundvattenkemiska förhållanden, påverkan av istider och bergspänningar.

Resultaten har publicerats av SKB och andra medverkande organisationer allt eftersom de har kommit fram. En sammanställning och utvärdering ges i den nationella översiktsstudien /8-52/.

En stor del av den kunskap vi idag har om förhållandena på 500 m djup i berggrunden kommer från de s k typområdesundersökningarna som bedrevs under åren 1977-1985. Under denna period borrades 85 kärnborrhål med en sammanlagd längd av mer än 45 km. Borrhålen kartlades med hjälp av olika typer av mätmetoder. Särskild omsorg lades på att bestämma bergets vattengenomsläpplighet och den kemiska sammansättningen på djupa grundvatten.

Förutom typområdena har som tidigare nämnts större forskningsinsatser genomförts i Stripa och i Äspö. Totalt har berggrundsförhållanden i djupa borrhål studerats på 12 platser spridda över landet. Redogörelser för resultaten av dessa undersökningar har lämnats i flera sammanhang, senast i FUD-program 92 – Lokalisering av ett djupförvar /8-54/.

En viktig observation är att lämpliga, respektive mindre lämpliga områden inte kan hänföras till någon speciell landsdel eller någon speciell geologisk miljö. I stället är det de lokala förhållandena i området och i den omgivande regionen som avgör ett områdes lämplighet.

SKBs slutsats, vilken är beskriven i FUD-program 92, kompletterande redovisning /8-31/, är att "det finns en betydande frihet att finna försvarsområden med utmärkta förhållanden för att isolera det radioaktiva materialet. Det är därför rimligt och realistiskt att i första hand vända sig till kommuner som själva önskar medverka eller på annat sätt visar ett intresse och som ligger i de delar av Sverige som kan ha bra förutsättningar för att där närmare utreda förutsättningarna för lokalisering av ett djupförvar".

I kompletteringen till FUD-program 92 har SKB presenterat en utförlig redogörelse av lokaliseringsprocessen och de lokaliseringskriterier som ligger till grund för

val av plats. Regeringen anger i sitt beslut från 1995-05-18 /8-55/ att "de lokaliseringsfaktorer och kriterier som SKB anger bör enligt regeringens uppfattning vara en utgångspunkt för det fortsatta lokaliseringsarbetet".

8.3.2 Översiktsstudier i nationell skala

I ovannämnda regeringsbeslut rörande SKBs program anger regeringen bland annat följande angående lokaliseringsarbetet:

"Regeringen anser i likhet med flertalet remissinstanser att SKB bör presentera sina översiktsstudier och platsanknutna förstudier samlad i syfte att ge bakgrund och förutsättningar i lokaliseringsarbetet. Regeringen anser att sådana samlade redovisningar bör presenteras i kommande forsknings- och utvecklingsprogram enligt 12 § kärntekniklagen."

Översiktsstudie 95 /8-52/, utgör SKBs samlade redovisning av översiktsstudier i nationell skala i enlighet med regeringsbeslutet. Studien bygger i huvudsak på det omfattande bakgrundsmaterial som SKB löpande tagit fram som ett led i det forsknings- och utvecklingsarbete som bedrivits sedan slutet av 1970-talet.

I Översiktsstudie 95 har ett antal nationella databaser redovisats och värderats, som på ett eller annat sätt har, eller kan ha betydelse för djupförvarets lokalisering. Översiktsstudien konstaterar att i nationell skala kan inte vetenskapliga, tekniska, och samhällsliga faktorer redovisas med den detaljering som är nödvändig för djupförvarets lokalisering. Informationen som redovisas omfattar i allmänhet också förhållanden på markytan och inte på de djup som är aktuella för djupförvaret, 400 - 700 m under markytan. Lämpligheten av ett område kan därför först bedömas i samband med förstudier, plats- och detaljundersökningar. Översiktsstudien kan främst identifiera förhållanden i olika landsdelar som kan vara ogynnsamma för ett djupförvar.

För lokaliseringsfaktorn **Långsiktig radiologisk säkerhet** har bl a följande databaser värderats: bergarter, topografi, brunndata och den s k Högsta Kustlinjen. Vidare har geologiska deformationszoner, lineament, kommande istider och jordskalv värderats liksom möjlighet till oavsiktligt intrång samt val av recipient. Förbrukning eller blockering av naturresurser som ej är nödvändig ska om möjligt undvikas. Områden som ligger i ovanliga bergarter, eller där möjligheten till malm finns är därvid av mindre intresse. Genom att undvika dessa områden minskar också möjligheten till framtida, oavsiktligt intrång i djupförvaret.

Av geologiska skäl bedöms det vara olämpligt att lokalisera djupförvaret till Fjällkedjan, Skåne, Gotland. Fjällkedjan är dessutom ett riksintresse för naturskydd och friluftsliv. Lokalisering till urberget under Öland

bedöms vara tekniskt möjligt, men olämplig med hänsyn till Naturresurslagens hushållningsbestämmelser.

Lokaliseringsfaktorn **Teknik** belyser hur genomförbarheten kan påverkas av olika förhållanden. När det gäller transporter till djupförvaret konstateras att tillgången på hamnar och järnväg är god och att denna faktor inte utgör någon begränsning för djupförvarets lokalisering sett i en nationell skala. Genomförande av bergundersökningar, anläggningsprojektering och säkerhetsanalys gynnas av att platsens geovetenskapliga förhållanden är lätta att förstå och tolka. Ett antal försök redovisas att i nationell skala bedöma möjliga regionala skillnader i tolkbarhet. Även om det är lämpligt att i första hand söka sig till platser som är enkla att tolka, kan man även på mera komplexa platser erhålla liknande tillförlitlighet i resultaten men då till priset av mera omfattande undersökningar. Detta är således en optimeringsfråga, bland många andra, vid lokaliseringen.

Förvaret skall också lokaliseras med hänsyn till lokaliseringsfaktorn **Mark och miljö**, med iakttagande av bl a lagen om hushållning med naturresurser. Lokalisering till områden som är direkt skyddade i lag är vare sig nödvändig eller önskvärd och skall undvikas. Områden som är av riksintresse i andra sammanhang kan emellertid inte utan vidare uteslutas eftersom djupförvaret i många fall kan utformas så att ändamålet med riksintresset inte påverkas negativt.

När det gäller lokaliseringsfaktorn **Samhälle** finns ett stort antal förhållanden behandlade i rapporten som framförallt kan värderas i den mer detaljerade skalan som används vid förstudier, plats- och detaljundersökningar.

SKBs tidigare slutsats att det finns många områden i Sverige som kan vara lämpliga för ett djupförvar är inte ändrad i och med Översiktsstudie 95. Lokaliseringen bör även fortsättningsvis vara inriktad mot i Sverige vanligt förekommande berggrund, då företrädesvis mer eller mindre omvandlade granitliknande bergarter, eller äldre mycket omvandlad sedimentär berggrund. Denna typ av "intressant" berggrund återfinns i stora delar av landet.

Detta innebär inte att områden med gabbro, eller områden där urberget överlagras av sedimentärt berg behöver uteslutas vid lokaliseringen. Dessa områden bedöms särskilt om det skulle visa sig att förstudier blir aktuella i kommuner med denna typ av berggrund. Vidare är det tekniskt möjligt att lokalisera förvaret under stora sjöar eller under havet. Det finns dock ingen särskild anledning att vare sig söka eller undvika en sådan lokalisering.

Förutom de redan avslutade, pågående eller planerade förstudierna, är det lämpligt med ytterligare någon, eller några förstudier. Det bör vara en fördel i det fortsatta arbetet och vid diskussioner med olika kommuner att det nu finns denna samlade redovisning av översiktsstudierna. Den bör ge en bättre möjlighet än tidigare för alla berörda att sätta sig in i bakgrund och allmänna förutsättningar på olika håll i landet för lokaliseringsarbetet.

8.3.3 Förstudier

Allmänt

I en förstudie utreds möjligheterna till en djupförvarslokalisering inom en kommun. Studierna baseras huvudsakligen på befintligt material.

Följande frågor behandlas:

- Vilka är de allmänna förutsättningarna för lokalisering av ett djupförvar till kommunen?
- Var kan det finnas lämpliga platser för ett djupförvar med hänsyn till geovetenskapliga och samhälleliga förhållanden ?
- Hur kan transporterna ordnas?
- Vilka är de viktiga miljö- och säkerhetsfrågorna?
- Vilka kan konsekvenserna bli (positiva och negativa) för miljö, ekonomi, turism och annat näringsliv inom kommunen och regionen?

SKB behöver inga formella tillstånd för att genomföra en förstudie. Uppläggningsen i praktiken är dock sådan att förstudierna sker i samförstånd mellan SKB och aktuell kommun.

En förstudie skall ge ett brett faktaunderlag för såväl kommunen som SKB. Båda parter kan sedan var för sig ta ställning till om man är intresserad av att påbörja en platsundersökning. Samma faktaunderlag blir tillgängligt för alla intresserade som därmed får möjlighet att påverka och framföra synpunkter långt innan några beslut behöver fattas om lokaliseringen av djupförvaret.

Förstudiens syfte är således att undersöka om det finns förutsättningar att förlägga ett djupförvar till kommunen, och ge underlag för beslut om fortsatta undersökningar. Frågor om principerna för slutförvaring, det valda konceptets för- och nackdelar, samt metoderna för att utvärdera den långsiktiga säkerheten behandlas i andra sammanhang och utreds inte i förstudien. Däremot tas dessa frågor givetvis upp i den dialog och de diskussioner som förs med alla intresserade i anslutning till en förstudie.

Dagsläge

SKB har genomfört en förstudie i Storumans kommun. Slutrapporten publicerades i februari 1995 /8-30/. Förstudien visar att det kan finnas goda förutsättningar för ett djupförvar i kommunen. Kommunen anordnade en (lokal) folkomröstning den 17 september 1995 gällande frågan: "Skall SKB få fortsätta att söka slutförvaringsplats i Storumans kommun?" Resultatet blev ca 29% Ja-, ca 70% Nej- och ca 1% Blanka röster. Valdeltagandet var ca 73%. Detta innebär att SKB avslutar sitt arbete i Storuman.

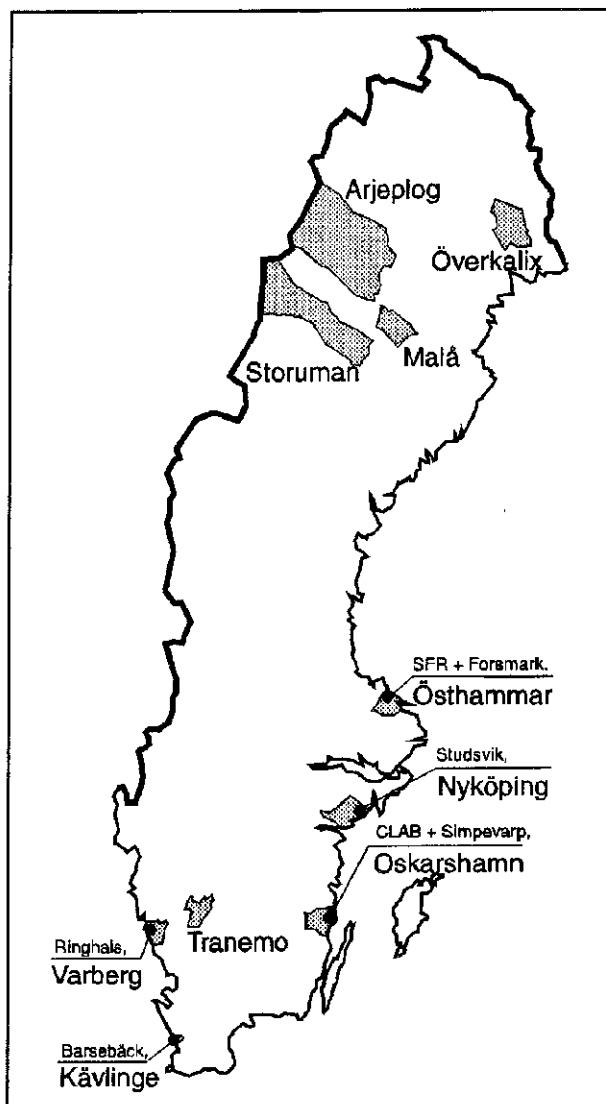
En andra förstudie pågår i Malå sedan vintern 1994. Samtliga utredningar har publicerats allt eftersom de blivit klara och en sammanfattande lägesrapport publicerades i maj 1995 /8-56/. Lägesrapportens syfte är att ge kommunen, dess referensgrupp och andra intresserade grupper i Malå och i regionen ett underlag för diskus-

sion och synpunkter innan slutrapporten skrivs. Slutrapporten beräknas vara klar under hösten 1995.

Under sensvåren 1995 har det pågått diskussioner med Tranemo kommun om en förstudie. Kommunalstyrelsen har dock beslutat att inte ta upp frågan.

Diskussioner om en förstudie har under den gångna 3-årsperioden även förts med Arjeplog och Överkalix kommuner. De har dock båda beslutat att inte föra frågan vidare.

En särskild översiktsstudie /8-57/ har belyst förutsättningarna till förstudier av kommuner med kärnteknisk verksamhet. För Oskarshamn, Nyköping och Östhammar är det befintliga geologiska underlaget omfattande och antyder möjlighet till goda förläggningsmöjligheter. Materialet är också väl lämpat för att i en förstudie ge en närmare bedömning av respektive kommuns geologiska förutsättningar för anläggning av ett djupförvar. För



Figur 8-8. Kommuner där förstudier genomförts (Storuman, Malå), påbörjats (Nyköping, Östhammar) och övervägs (Oskarshamn, Varberg). I Arjeplog, Överkalix, Tranemo och Kävlinge har diskussioner förts om förstudier men dessa kommuner är ej längre aktuella.

dessa kommuner anser SKB att det är av primärt intresse att det genomförs förstudier så att underlaget för lokalisering av ett djupförvar får den bredd och den komplettering som krävs.

För Varbergs kommun råder en viss osäkerhet om berggrundens lämplighet. Bland annat saknas modernt geologiskt kartmaterial för delar av kommunen. För att få ett likvärdigt underlag med övriga kärntekniska kommuner krävs därför i ett tidigt skede kompletterande geologisk kartläggning. SKB anser det dock önskvärt att även Varberg ingår i underlaget och att man genom en förstudie bättre belyser förhållandena.

När det gäller Kävlinge kommun konstateras att såväl geologiska som tekniska förhållanden visar att en lokalisering av djupförvaret till kommunen skulle vara komplicerad. SKB anser därför att det ej är av intresse att genomföra en förstudie i Kävlinge kommun.

Det geografiska läget för kommuner där förstudier är klara, pågår, diskuteras, eller där diskussionerna har avbrutits framgår av kartan, Figur 8-8.

Resultat

De genomförda och pågående studierna visar att en yta av storleksordningen en kommun ofta kan vara en lämplig utgångspunkt för en översiktlig genomgång av en regions förutsättningar för lokalisering av ett djupförvar. I denna skala finns ofta heltäckande men ändå relativt detaljerade geologiska kartor, liksom flyggeofysiska och andra geovetenskapliga kartor. Att utnyttja den administrativa enhet som en kommun innebär underlättar vid utredningar av socioekonomiska konsekvenser liksom vid genomgångar av kommunala översiktsplaner samt andra uppgifter på befintlig eller planerad markanvändning.

En förstudie sker i samråd eller samverkan med en kommun. Detta innebär bland annat att kommunen har möjlighet att påkalla utredningar inom förstudiens ram. I Storuman har kommunen eller dess referensgrupp påkallat flera utredningar som belyser konsekvenser av ett djupförvar på samhällsutvecklingen, psykosociala förhållanden och inverkan på friluftsliv och miljö. Dessa frågor är viktiga på det lokala planet men tenderar att glömmas bort i mera övergripande sammanhang. Förstudierna har därför allmänt sett inneburit att dessa frågor lyfts fram och utretts.

Den allmänna slutsatsen från förstudien i Storuman är att det finns goda tekniska förutsättningar att lokalisera, bygga och driva ett djupförvar. Någon slutsats rörande den långsiktiga säkerheten kan inte göras eftersom en sådan analys kräver kunskap om berggrundsförhållandena på större djup. Baserat på förhållanden i markytan har förstudien identifierat två områden i den östra delen av kommunen som kan ha bra förutsättningar för ett djupförvar. Båda områdena består av homogen sprickfattig granit. Områdena berörs inte av några hinder för lokalisering med avseende på markanvändning och miljö och områdena ligger i närheten av befintlig väg och järnväg som kan användas för djupförvarets transporter.

8.4 TRANSPORTER TILL DJUPFÖRVARET

I samband med studierna av inlandskommunerna Storuman och Malå har transportfrågorna aktualiserats och utreds. Dessa utredningar har inkluderat godstyper, godsmängder, transportsätt, transportvägar och säkerhetsfrågor. Eftersom dessa frågor endast översiktligt har berörts i tidigare FUD-program och på grund av den kunskapsuppbyggnad som har skett i samband med ovannämnda studier redovisas transportfrågorna något mera utförligt i det följande.

8.4.1 Godstyper och godsmängder

Transportsystemet skall hantera två skilda typer av gods, tunga enheter med inkapslat bränsle och annat långlivat avfall samt massgods i form av bentonit och eventuellt sand. En genomgång över vilka godsmängder transportsystemet skall hantera och vilka transportsätt som kan vara lämpliga har gjorts i studierna till Storuman och Malå /8-58, 59, 60, 61/. Resultat från dessa studier redovisas nedan.

De tunga enheterna är specialkonstruerade transportbehållare för inkapslat bränsle samt liknande behållare för kokiller med annat avfall. Transporterna av det inkapslade materialet förutsätts ske från hamnen i Simpevarp. De transportmoment som finns från inkapslingsanläggningen till djupförvaret framgår av Figur 8-9. Totalt antal enheter till förvaret beräknas till ca 300 stycken per år. Behållarna returtransporteras för återfyllning.

De största godsmängderna som skall transporteras till djupförvaret kommer emellertid att utgöras av ca 15 000 ton bentonit per år. Beroende på val av återfyllnadsmaterial kan även 45 000 ton sand behöva transporteras till djupförvaret. Siffrorna är preliminära. Behovet av buffert och återfyllnadsmaterial styrs av underjordsanläggningens utformning samt återfyllnadsteknikens utveckling, inklusive förändringar i blandningsförhållandet mellan bentonit och ballast.

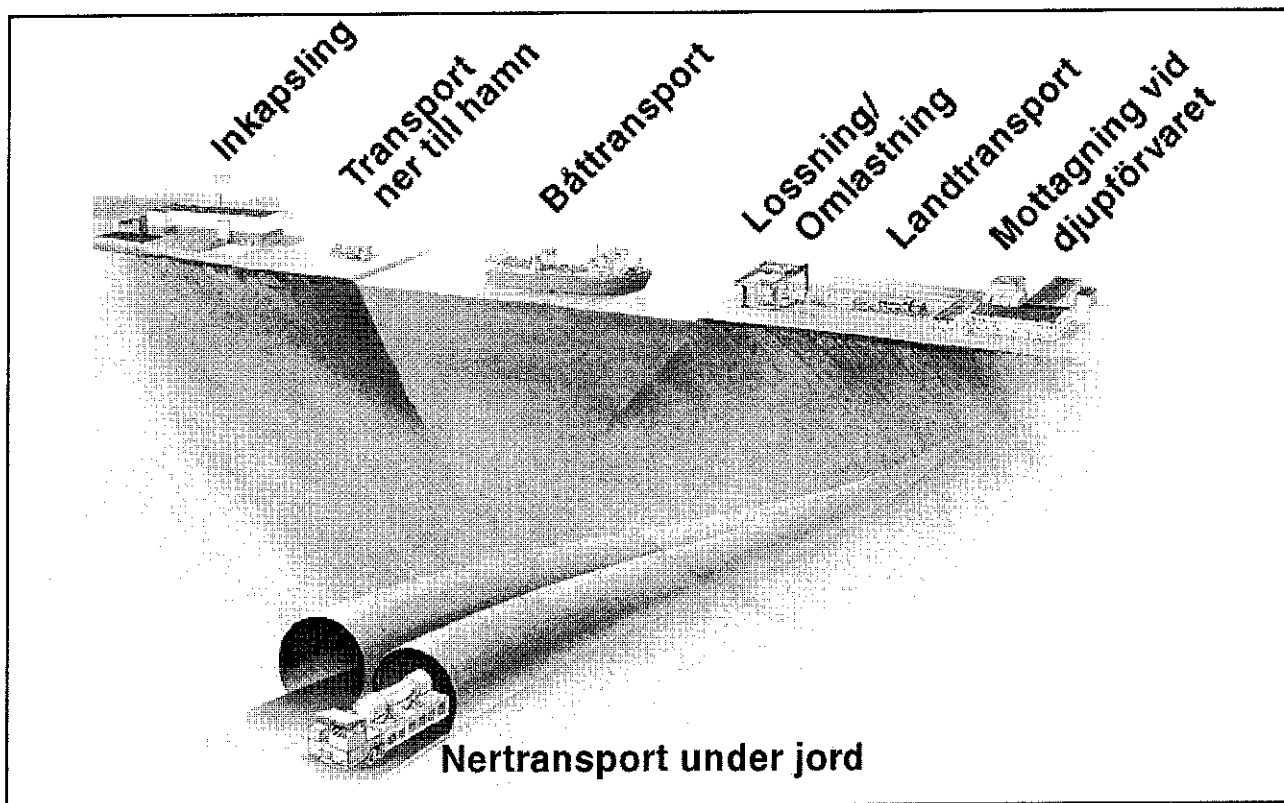
8.4.2 Transportsätt för radioaktivt material

Transporten från CLAB sker med fartyg till en lämplig hamn för vidare landtransport till djupförvaret.

Transporten från hamnen till djupförvaret sker med järnväg eller på väg. I studierna för djupförvarslokaliseringen ingår inventering av lämpliga hamnar i anslutning till väg eller järnväg till tilltänkt lokaliseringsplats.

Den grundläggande tekniska skillnaden mellan järnväg och landsväg är att järnväg byggs för högre axellaster och att lasten kan fördelas över större markyta.

För att slippa omlastningar är det en fördel om samma transportsätt används på hela sträckan. Beroende främst på lokala förhållanden kan det ändå visa sig fördelaktigt



Figur 8-9. Transportmoment från inkapslingsanläggningen till ett djupförvar i inlandet.

eller mindre kostsamt att byta transportmedel inför avslutningstransporten.

8.4.3 Transportsäkerhet

Kärnbränsle, såväl nytt som använt, består av ett fast keramiskt material som är inneslutet i metallrör av en zirkoniumlegering. Bränsleelementen kommer att inneslutas i kapslar som är helt täta. Risken för spridning av radioaktiva ämnen under hantering eller transport är näst intill obefintlig. Däremot når strålning från bränslet ut genom kapseln, som måste transporteras i strålskärmande behållare. Transportbehållarna ger samtidigt ett kraftigt mekaniskt skydd för kapslarna under transporten. En transportbehållare med kapsel beräknas väga 50-70 ton.

Merparten av s k "annat avfall" förväntas vara ingjutet i betongkokiller. Även denna avfallstyp kräver viss strålskärming varför kokillerna transporteras i transportbehållare av stål, snarlika dem som används i SFR.

Transportbehållarna avskärmar strålningen till en så låg nivå att de kan hanteras utan särskilda skyddsanordningar vid lastning och lossning mellan fartyg, fordon och tåg. Eftersom behållarna skall tåla stora yttre påfrestningar, behöver transportsystemet inte utformas för att ge ytterligare mekaniskt skydd åt godset. Däremot är

transportbehållarna med innehåll klassat som farligt gods enligt det internationella regelverket och skall märkas, separeras och övervakas enligt reglerna för radioaktivt gods.

Transportbehållarna konstrueras i enlighet med de krav som ställts upp av IAEA. De skall dels skydda den inneslutna kapseln mot skador, dels skärma av den strålning som avges från den, så att behållaren kan hanteras vid lastning och lossning. Behållarnas hållfasthet är då sådan, att de kan motstå krafter som överstiger dem som kan bli aktuella vid tänkbara olyckor, som kollisioner och fall, utan att gå sönder. Vad som är viktigt i en olyckssituation är att behållarens strålskärmande förmåga i huvudsak bibehålls, d v s att den tunga stål-kroppen finns kvar kring det inneslutna avfallet.

Säkerheten under transportererna mellan inkapslingsanläggning och djupförvar inriktas således främst på följande

- risken att det inträffar olyckor och incidenter under transporten skall minimeras,
- om en olycka av något slag trots allt inträffar, skall den inte orsaka frigörelse av radioaktivt material,
- strålningsnivåerna på transportbehållarnas utsida skall ligga under gällande gränsvärden så att de kan hanteras utan risk för personalen.

Genom att åstadkomma detta försäkras man sig om att transportererna inte medför någon fara för omgivningen i närheten av förvaret eller längs de transportvägar som används.

En del av säkerheten i transportererna utgörs av det fysiska skyddet, som syftar till att förhindra stöld och avsiktlig åverkan på behållarna. Det består av en kombination av tekniska och administrativa åtgärder som skyddar godset och möjliggör upptäckt och larm om något onormalt inträffar. Det gäller bevakning, kommunikation med en transportledningscentral och liknande.

8.4.4 Erfarenheter av dagens transporter

SKBs nuvarande system för sjötransport har varit i bruk sedan 1982. Sedan 1985 har 80-100 behållare med an-

vänt bränsle årligen transporterats till CLAB, och sedan 1988 årligen ungefär lika många transportbehållare med driftavfall från kärnkraftverken till SFR i Forsmark. Erfarenheterna av dessa transporter är goda. Inga störningar eller olyckor av säkerhetsmässig betydelse har inträffat. Den sammanlagda stråldosen till hanteringspersonalen har hållits på en låg nivå. Sålunda har t ex besättningen på fartyget M/S Sigyn, som används för detta arbete, inte erhållit några stråldoser som överstiger den normala bakgrundsstrålning som alla människor får.

I andra länder, som Storbritannien, Frankrike, Tyskland, Japan och USA har man mångårig erfarenhet av järnvägs-, landsvägs- och sjötransporter, med lika goda erfarenheter ur olyckssynpunkt som i Sverige.

9 PROGRAM FÖR DJUPFÖRVAR

Huvudlinjerna i programmet för lokalisering av djupförvaret ligger fast från FUD-program 92 och dess kompletterande redovisning /9-1, 2/. En modifiering av tidsplanen med hänsyn till de gångna tre årens utveckling är emellertid nödvändig. Under perioden 1996-2001 är huvuduppgiften att ta fram underlag för ansökan om att lokalisera djupförvaret till en specifik plats. Det viktigaste närliggande målet är att påbörja platsundersökningar.

9.1 REGERINGSBESLUT ANGÅENDE LOKALISERINGSPROCESSEN

Regeringsbeslutet från maj 1995 /9-3/ avseende den kompletterande redovisningen till FUD-program 92 har inneburit ett antal för lokaliseringsarbetet viktiga klargöranden;

- De lokaliseringsfaktorer och kriterier som SKB angivit i kompletteringen till FUD-program 92 "bör enligt regeringens uppfattning vara en utgångspunkt för det fortsatta arbetet".

Detta innebär bl a att de kriterier för säkerhet, teknik, mark och miljö samt samhälle som SKB angivit kan ligga till grund för fortsatta lokaliseringsstudier och för ytterligare precisering av acceptanskriterier vid platsundersökningar. Regeringens beslut innebär också att SKBs strävan att uppfylla höga miljö- och säkerhetskrav samtidigt som man söker lokal samverkan och förståelse har regeringens stöd.

- Kommuner i vilka SKB genomför förstudier kan erhålla upp till 2 miljoner kr per år för att "följa och bedöma samt lämna information i frågor som rör slutförvaring av använt kärnbränsle och kärnavfall". Detta innebär att berörda kommuner nu direkt tillförsäkras egna resurser för medverkan i lokaliseringsarbetet. I de första förstudierna har kommunernas kostnader täckts av SKB.
- I regeringsbeslutet sägs att "Ansökningarna om tillstånd enligt 4 kap. naturresurslagen och 5 § kärntekniklagen att uppföra ett slutförvar för använt kärnbränsle och kärnavfall bör innehålla material för jämförande bedömningar som visar att platsanknutna förstudier i enlighet med SKBs redovisning bedrivits på mellan 5-10 platser i landet och att platsundersökningar bedrivits på minst två platser samt skälen för valet av dessa platser. Regeringen finner såvitt framgår av SKBs redovisning att den planerade detaljun-

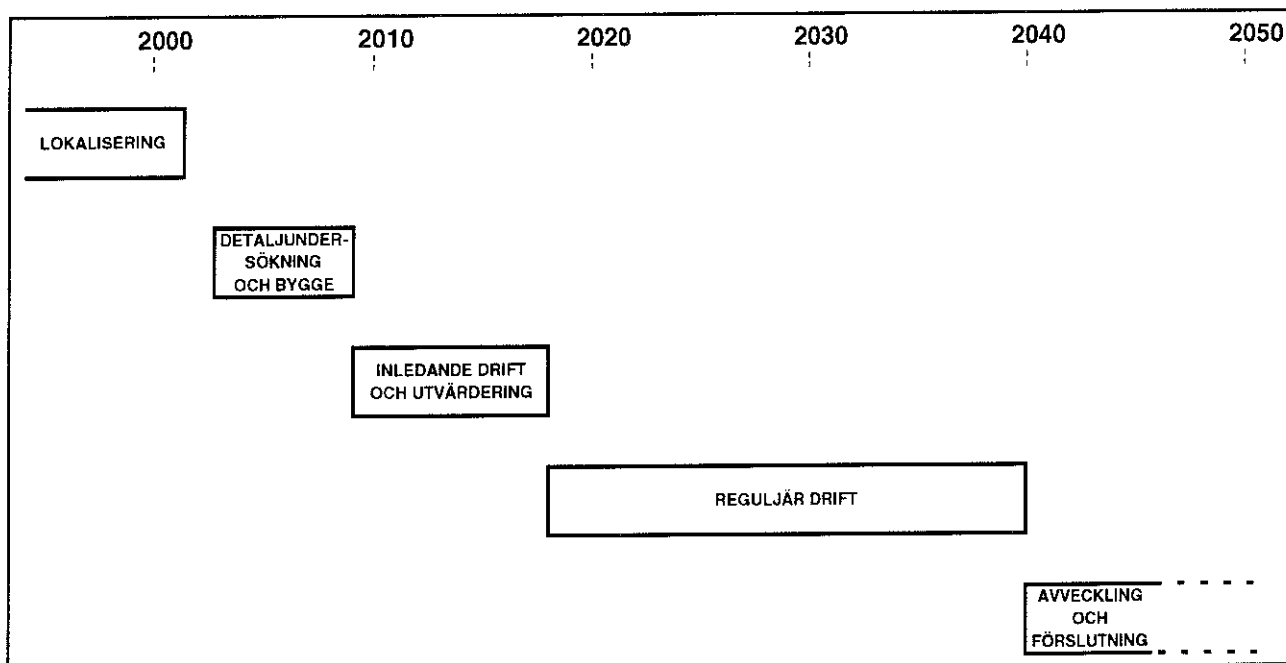
dersökning som skall genomföras på en plats i landet utgör ett led i uppförandet av en kärnteknisk anläggning som avses utgöra ett slutförvar för använt kärnbränsle och kärnavfall."

Detta innebär såvitt SKB kan bedöma att ansökan om lokaliseringstillstånd för djupförvaret skall inlämnas för prövning enligt såväl naturresurslagen som kärntekniklagen i samband med att SKB vill påbörja detaljundersökning av en utvald plats. Denna tillståndsprövning blir därmed det första stora beslutstillfället vad gäller djupförvarssystemets utformning och lokalisering. (I FUD-program 92 var en sådan heltäckande prövning planerad att ske först efter detaljundersökning.) Om tillstånd erhålls bör nästa stora beslutstillfälle vara före drifttagning av djupförvaret d v s innan den första avfallskapseln deponeras.

Detaljundersökning och bygge av djupförvaret är till sin omfattning och inriktning starkt beroende på de lokala förhållanden som kommer att råda på den aktuella platsen. Dessa förhållanden blir ordentligt kända först i samband med en platsundersökning. I ansökan om lokaliseringstillstånd bör det därför vara möjligt att ange de olika faserna i arbetet med detaljundersökning och uppförande av anläggningen. Ett tillstånd baserat på en sådan ansökan kan då innehålla föreskrifter om specifika villkor för arbetets fortsättning från en fas till nästa. I tillståndet kan även regleras i vilken ordning resultat och underlag från de olika stegen av detaljundersökningen skall redovisas till kärnkraftinspektionen och andra berörda myndigheter. Detta innebär att även om detaljundersökning och bygge nu utgör en sammanhållen huvudetapp så sker arbetet i steg med successiv granskning från säkerhetsmyndigheternas sida.

- Länsstyrelsen i de län som berörs av förstudier, platsundersökningar eller detaljundersökning förutsätts av regeringen ta "ett samordnande ansvar för de kontakter med kommuner och statliga myndigheter som behövs för att SKB ska kunna ta fram underlag till en MKB för prövning enligt kap 4. naturresurslagen".

Detta innebär att samordningsansvaret för MKB-förfarandet läggs på en regional myndighet vilket bl a bör bidra till att de synpunkter som kan finnas från de lokalt (kommun) och regionalt (grann- och transportkommuner) närmast berörda blir väl beaktade.



Figur 9-1. Översiktlig tidsplan för huvudetapperna i djupförvarsprojektet. Inför varje etapp krävs säkerhetsredovisning och nytt tillstånd.

9.2 ETAPPINDELNING AV DJUPFÖRVARSPROGRAMMET

Regeringsbeslutet innebär att tyngdpunkten vid myndigheternas granskning av djupförvarets lokalisering ligger då SKB ansöker om att få starta detaljundersökning. Detta ger en ökad betydelse åt platsundersökningsskedet i förhållande till vad som antogs i FUD-program 92. Mera resurser och tid måste därför avsättas till detta skede, vilket återspeglar sig i den reviderade tidsplanen nedan. Å andra sidan bör myndighetsgranskning efter genomförd detaljundersökning kunna bli mindre omfattande. Trots de förskjutningar i tidsplanen som görs i den inledande etappen finns det anledning och möjlighet att hålla fast vid 2008 som den tidigaste tidpunkten för start av deponering.

Regeringsbeslutet innebär att det även finns anledning att revidera den etappindelning som presenterades i FUD-program 92. Den nya indelningen är kopplat till myndighetsgranskningar av djupförvarets lokalisering och drift. I denna process finns fem väldefinierade etapper där säkerhetsredovisning och tillstånd krävs innan nästa etapp kan påbörjas. De olika etapperna är:

- Etapp 1. Lokalisering.
- Etapp 2. Detaljundersökning och bygge.
- Etapp 3. Inledande drift och utvärdering.
- Etapp 4. Reguljär drift.
- Etapp 5. Avveckling och förslutning.

En översiktlig tidsplan för ovannämnda etapper presenteras i Figur 9-1.

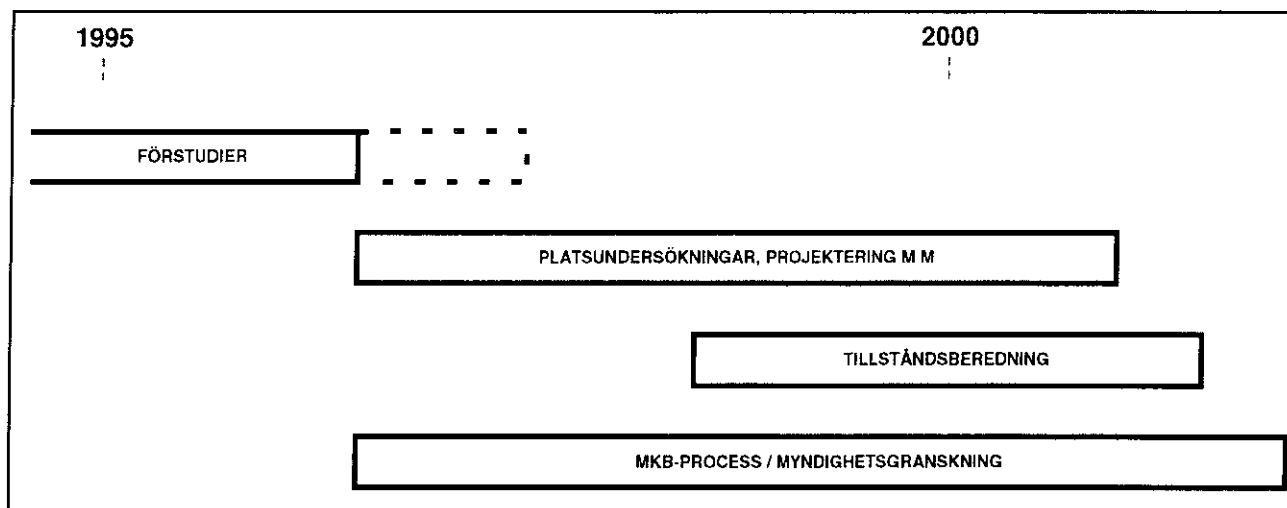
Hur snabbt lokaliseringsprocessen framskrider är beroende av såväl tekniska som samhällsliga och politiska faktorer, av vilka de sistnämnda är svåra att tidsätta. Allmänt kan konstateras att de största osäkerheterna finns i den inledande etappen. Särskilt gäller detta tidpunkten för start av platsundersökningar där förseningar beroende på samhällsliga eller politiska faktorer kan uppstå. En diskussion om osäkerheten i tidsplanen finns i kapitel 15.

För att komma framåt i lokaliseringsprocessen är det därför angeläget att under den närmaste sexårsperioden tidigt fokusera insatserna på specifika platser. Då övergår projekteringsinsatser och undersökningsinsatser från generella program och planer till konkreta platsanknutna arbeten. Huvudaktiviteter inom respektive etapp är följande:

Etapp 1

Lokalisering

Etappen består i framtagning av det underlag som fordras för att välja plats för djupförvaret. Underlaget består av översiktsstudier /9-4/ över hela landet, förstudier i 5-10 kommuner /9-5/ samt platsundersökningar i minst två kommuner. Parallellt pågår arbete med anläggningsutformning och projektering, funktions- och säkerhetsanalyser, miljökonsekvensbeskrivning och MKB-samaråd. Etappen avslutas med sammanställning av underlag inför lokaliseringsansökan enligt naturresursslagen och



Figur 9-2. Tidsplan för etapp 1, lokalisering.

ansökan om att få uppföra djupförvaret enligt kärntekniklagen. Även tillstånd enligt bl a vattenlagen och plan- och bygglagen kommer att krävas liksom andra kommunala tillstånd.

En mera utförlig redovisning av etappens aktiviteter ges senare i detta kapitel.

Ett schema för lokaliseringsetappen visas i Figur 9-2. Platsundersökningar beräknas ta 4-5 år att genomföra baserat på den uppläggning av undersökningarna som presenteras i avsnitt 9.4.

Etapp 2

Detaljundersökning och bygge

Etappen innebär projektering och bygge av ovan- och underjordsanläggningar samt översiktliga undersökningar av samtliga förvarsdelar. Den del som skall användas för inledande drift (driftsteg 1) undersöks mera i detalj. Underlaget erhålls främst från tunnlar ner till förvarsdjup och från borrhål och mätningar från dessa tunnlar. Anslutande vägar och järnväg byggs också. Ett löpande granskningsarbete förutses från framförallt Kärnkraftinspektionens och Strålskyddsinstitutets sida baserat på i lokaliseringstillståndet uppställda föreskrifter för olika steg i arbetet med att uppföra djupförvaret. Etappen avslutas med ansökan om tillstånd (KTL) för inledande drift.

Etapp 3

Inledande drift och utvärdering

Etappen består av deponering av ca 10% eller ca 400 av de totalt ca 4 500 kapslarna med använt kärnbränsle.

Under både den inledande och den reguljära driften sker deponering i iordningställda tunnlar parallellt med att nya tunnlar byggs ut. Utbyggnaden av förvaret kommer därför att pågå under hela dess driftperiod.

Erfarenheterna av den inledande driften utvärderas under flera år.

Parallellt genomförs detaljundersökning av förvarsområden för den reguljära driften (område för deponering av använt bränsle och område för deponering av annat avfall). Förutsatt att utvärderingen av den inledande driften faller väl ut och man bestämmer sig för att gå vidare samt att detaljundersökningen slutligt bekräftar lämpliga berggrundsförhållanden ansöks om tillstånd (KTL) för reguljär drift.

Etapp 4

Reguljär drift

Under den reguljära driften (driftsteg 2) deponeras ca 4 000 kapslar med använt kärnbränsle. Under denna etapp kommer även annat radioaktivt avfall att deponeras i en särskild del av djupförvaret. Etappen avslutas med ansökan om tillstånd (KTL) till förslutning av anläggningen.

Etapp 5

Avveckling och förslutning

Ovanjordsanläggningarna rivs och underjordsanläggningarna återfylls och pluggas igen. Innan detta görs har man kunnat observera de först deponerade kapslarna under flera decennier. Omfattningen av den framtida övervakningen av förvaret och/eller förvarsplatsen beslutas av varje generation för sig.

9.3 PROGRAM FÖR LOKALISERINGSSTUDIER

Uppläggningsarbetet har senast redovisats i kompletteringen till FUD-program 92 /9-2/. I regeringens beslut /9-3/ anges att "Ansökningarna om tillstånd enligt 4 kap. naturresurslagen och 5 § kärntekniklagen att uppföra ett slutförvar för använt kärnbränsle och kärnavfall bör innehålla material för jämförande bedömningar som visar att platsanknutna förstudier i enlighet med SKBs redovisning bedrivits på mellan 5-10 platser i landet och att platsundersökningar bedrivits på minst två platser samt skälen för valet av dessa platser". Som framgår av redovisningen i kapitel 8 har SKB påbörjat arbetet med att ta fram det underlag som kommer att krävas. För den kommande sexårsperioden (1996-2001) är målet att ta fram allt detta underlag för en ansökan om att få lokalisera och uppföra ett djupförvar på en vald plats. Det viktigaste närliggande målet är att genomföra erforderliga förstudier och påbörja platsundersökningar.

En samlad redovisning av översiktsstudier och förstudier har begärts av regeringen i kommande forsknings- och utvecklingsprogram.

En samlad redovisning av landsomfattande översiktsstudier presenteras som framgått av kapitel 8, i samband med detta forskningsprogram /9-4/. Syftet är att ge bakgrund och förutsättningar för lokaliseringsarbetet och sammanfatta de översiktsstudier som SKB genomfört under åren. Detta betyder inte att sådana studier är helt avslutade. Det kan uppkomma behov av regionala översiktsstudier i samband med kommande förstudier för att belysa t ex geologiska förhållanden, markanvändning, transportmöjligheter eller socioekonomiska förhållanden i den aktuella regionen.

9.3.1 Förstudier

SKBs lokaliseringsprogram bygger på att man genomför mellan 5-10 förstudier.

Förstudien av Storuman är klar och förstudien av Malå är i sin slutfas. Förstudier påbörjas nu i Nyköping och Östhammar och diskuteras med Oskarshamns och Varbergs kommuner. Förstudier kan bli aktuella för ytterligare några kommuner.

Omfattningen på kommande förstudier kommer att baseras på erfarenheterna från förstudierna av Storuman och Malå. En viss minskning av utredningsbehovet kan dock förutses eftersom mycket av det generella material som har tagits fram för Storuman och Malå även kan utnyttjas vid kommande förstudier.

Programmet för kommande förstudier som baseras på de nu genomförda förstudierna, kommer att anpassas till de specifika förhållanden som finns i respektive kommun. Utredningar och faktasammanställningar görs inom följande områden:

- berggrund,
- mark och miljö,
- transporter,
- samhällsinverkan.

Huvudsakligen utnyttjas och sammanställs befintliga data och tillgänglig information, t ex ekonomiska och geologiska kartor, geovetenskapliga databaser, kommunala översiktsplaner m m.

Berggrund

- sammanställning av tidigare gjorda geovetenskapliga studier,
- förekommande bergarter och deras egenskaper,
- lineament/sprickzoner,
- berggrundens stabilitet, seismiska förhållanden,
- hydrogeologiska och vattenkemiska förhållanden,
- malmpotential, potential för industrimineral,
- sammanställning av bergtekniska erfarenheter i regionen.

Den allmänna genomgången av kommunens geovetenskapliga förutsättningar inriktas på att identifiera områden som kan vara ogynnsamma för ett djupförvar. Om det efter denna genomgång visar sig att det finns kvar områden där inga uppenbart negativa förhållanden har identifierats görs mera detaljerade studier av dessa områden med en syfte att bedöma om något kan vara lämpligt för vidare studier.

Mark och Miljö

Tillsammans med kommunen görs en genomgång av planer för utnyttjande av mark och vatten. Översiktsplanerna studeras liksom ekonomiska kartor och markägarförhållanden. Vidare görs en kommunspecifik sammanställning av olika miljö- och säkerhetsaspekter.

Arbetet resulterar i underlag om i vilka delar av kommunen som det finns väsentliga begränsningar för lokalisering av ett djupförvar ur samhällsplanerings- och miljösynpunkt.

Transporter

Utredningen beskriver möjliga transportsätt och transportvägar av inkapslat använt kärnbränsle och annat avfall från inkapslingsanläggningen till kommunen. Även möjliga transportsätt och transportvägar för återfyllnadsmaterial utreds.

Samhällsinverkan

Under denna rubrik utreds vilka konsekvenser en djupförvarslokalisering kan innebära för ekonomi och samhällsliv i kommunen och regionen. Utredningarnas inriktning och omfattning bestäms till stor del av respektive kommun.

9.3.2 Platsundersökningar

Som tidigare nämnts innebär regeringens beslut från maj 1995 /9-3/ att prövningen av SKBs förslag till plats och utformning av djupförvaret ska göras när SKB ansöker om att få genomföra detaljundersökning innebärande bl a bygge av tunnel eller schakt. Prövningen kommer att omfatta såväl naturresurslagen som kärntekniklagen. Fokuseringen av myndighetsprövningarna till detta tillfälle innebär att ett omfattande beslutsunderlag måste tas fram under platsundersökningsskedet.

SKB planerar att genomföra minst två platsundersökningar. Nyckelfrågor som dessa undersökningar ska besvara för respektive plats är

- Hur ser berggrundsförhållandena ut?
- Vilka förutsättningar finns det för underjordsbyggnation?
- Vilka förutsättningar finns för ett förvars långsiktiga säkerhet?
- Vilka konkurrerande markanvändningsintressen finns?
- Vilka miljökonsekvenser kan det bli?
- Hur kan anslutning till befintliga vägar/järnvägar göras?
- Var är det lämpligt att förlägga ovan- respektive underjordsanläggningarna?
- Hur ska dessa anläggningar utformas?
- Hur kan transporter ordnas?

För att besvara dessa och andra frågor kommer ett beslutsunderlag att utarbetas för respektive plats med hjälp av följande aktiviteter.

Geovetenskapliga undersökningar, vilka syftar till att ta fram platsspecifika data för att preliminärt ange var och hur djupförvaret kan förläggas i berggrunden samt för analysen av den långsiktiga säkerheten. Program för geovetenskapliga undersökningar beskrivs närmare i avsnitt 9.4.

Projektering av djupförvaret med syfte att utarbeta förslag till utformning av djupförvarets anläggningar ovan och under jord, anpassade till geografiska och geologiska förhållanden på den undersökta platsen. SKBs plan för skedesindelad projektering redovisades i kompletteringen till FUD-program 92 /9-2/. I avsnitt 9.5 redovisas planer för det fortsatta arbetet med djupförvarets utformning och teknik för bygge och drift.

Funktions- och säkerhetsanalyser, vilka ska leda fram till det underlag som behövs för att kunna få tillstånd enligt kärntekniklagen att påbörja detaljundersökning och uppföra djupförvaret. Program för dessa beskrivs i kapitel 10.

Utredningar av samhällsfrågor samt mark- och miljöfrågor som ytterligare belyser ett djupförvars möjliga inverkan på samhälle, markanvändning och miljö i den

aktuella kommunen och regionen. Utredningarna bygger vidare på det material som lagts fram i förstudien. Ett syfte är att ge underlag för att anpassa djupförvarsanläggningarnas utformning och placering inom det undersökta området så att miljöinverkan och eventuella andra störningar minimeras.

Miljökonsekvensbeskrivning (MKB) och MKB-samråd som syftar till att ta fram ett allsidigt och tydligt beslutsunderlag i enlighet med de krav som ställs på miljökonsekvensbeskrivningar enligt de för djupförvarsanläggningen relevanta lagarna. MKB behandlas i kapitel 3.

Som tidigare framgått räknar SKB med att kunna påbörja platsundersökningar inom de närmaste åren. Innan en platsundersökning startar kommer följande dokumentation att föreligga.

- En utredning som visar hur SKB, genom utvärdering mot vägledande kriterier, har kommit fram till att området kan ha bra förutsättningar och därför är av intresse för närmare undersökning. (**Slutrapport förstudie** med underliggande rapporter.)
- En sammanställning som, med hjälp av översiktsstudier, utförda förstudier och annat relevant material sätter in det aktuella området i ett nationellt sammanhang och anger skälen till varför SKB anser det lämpligt att påbörja platsundersökningar i området. (**Rapport** med motivering för varför platsen valts.)
- En överenskommelse mellan SKB och kommunen om uppläggnings- och formerna för platsundersökningsskedet. (**Genomförandeprogram** med beskrivning av formerna för **MKB-samråd**.)
- Ett program för geovetenskapliga platsundersökningar som bl a anger mål, mätmetoder, utvärderingsmetodik för undersökningarna liksom de acceptanskriterier mot vilka platsen utvärderas. (**Geovetenskapligt platsundersökningsprogram**.)

Genomförandeprogram liksom geovetenskapligt platsundersökningsprogram måste bygga på specifika lokala förutsättningar och blir därför med nödvändighet delvis olika för de platser det blir fråga om. Platsundersökningsskedet måste genomföras stegvis och de resultat som successivt kommer fram kan föranleda omvärderingar såväl rörande intresset av fortsatta undersökningar som inriktningen av dem.

9.4 GEOVETENSKAPLIGA UNDERSÖKNINGAR

Ett program för geovetenskapliga platsundersökningar är under utarbetande. Det kommer att publiceras i god tid innan platsundersökningar påbörjas. Dagsläget be-

skrivs nedan. Programmet baseras främst på erfarenheter från berggrundsundersökningar inom det svenska kärnavfallsprogrammet (inklusive Stripa och Äspölaboratoriet men även på utländska erfarenheter /9-6, 7, 8/.

Förutom arbetet med platsundersökningsprogrammet redovisas i det här avsnittet också planer för vidareutveckling av metoder och instrument liksom datahantering och kvalitetssäkring.

9.4.1 Allmänt

En geovetenskaplig platsundersökning innebär insamling av platsspecifika data för beskrivning av berggrundens egenskaper. Syftet är att identifiera och undersöka en plats i berggrunden för djupförvaret och utvärdera dess lämplighet.

En platsundersökning har följande huvudmål:

- Undersökningarna skall ge en geovetenskaplig förståelse av platsen och dess regionala omgivning med avseende på nuvarande tillstånd och naturligt pågående processer.
- Undersökningarna skall ge erforderliga geovetenskapliga data för en platsanpassad utformning av djupförvaret samt för analys av djupförvarets långsiktiga funktion och radiologiska säkerhet.

Huvudinriktningen är att SKB skall genomföra två platsundersökningar och att detta görs i två av de kommuner där förstudier genomförts. Undersökningsprogrammet bygger på att man i dessa förstudier har identifierat prioriterade områden. Platsundersökningarna bedrivs parallellt med ca ett halvt års förskjutning.

En platsundersökning resulterar i en samlad geovetenskaplig beskrivning av platsen och dess regionala omgivning. Data och resultat från platsundersökningen används vid funktions- och säkerhetsanalyser för beräkningar och beskrivningar över de naturliga och tekniska barriärernas funktion för ett djupförvar inplacerat på den undersökta platsen. Resultatet presenteras i en säkerhetsrapport inför ansökan om detaljundersökning.

Vid projekteringsarbetet används platsdata för att uppätta layouter för djupförvarets olika delar, med anpassning till platsens och berggrundens geografiska och geologiska förhållanden. Vidare genomförs bygganalys, dvs beräkningar och analyser av bergets egenskaper och begränsningar med avseende på bl a byggteknik och arbetarskydd, m m.

Platsutvärdering är ett samlingsbegrepp för den interaktiva process som består av ovan nämnda delar för utvärdering av en undersökt plats med avseende på dess lämplighet för ett djupförvar, se Figur 9-3. I en samlad utvärdering hanteras förutom säkerhet och teknik även andra lokaliseringsaspekter som faller under begreppet miljö och samhälle. Miljökonsekvensbeskrivningen ska ge en samlad bild av det planerade djupförvarets effekter.

9.4.2 Genomförande

Omfattningen av en platsundersökning beror på undersökt geografisk yta, undersökt djup och undersökningarnas innehåll. Beträffande omfattning används de geografiska begreppen, område, delområde och plats, se Figur 9-4. En platsundersökning har börjat när borrhningar av djupa undersökningsborrhål har påbörjats.

En platsundersökning genomförs i två huvudsteg; inledande och komplett platsundersökning. Huvudsyftet med den inledande platsundersökningen är att med relativt begränsade insatser utröna om bedömningarna från förstudien stämmer. De inledande studierna syftar även till att identifiera var inom ett angivet område potentialen är störst för ett djupförvar och därmed var de fortsatta undersökningarna ska koncentreras.

Inledande platsundersökning

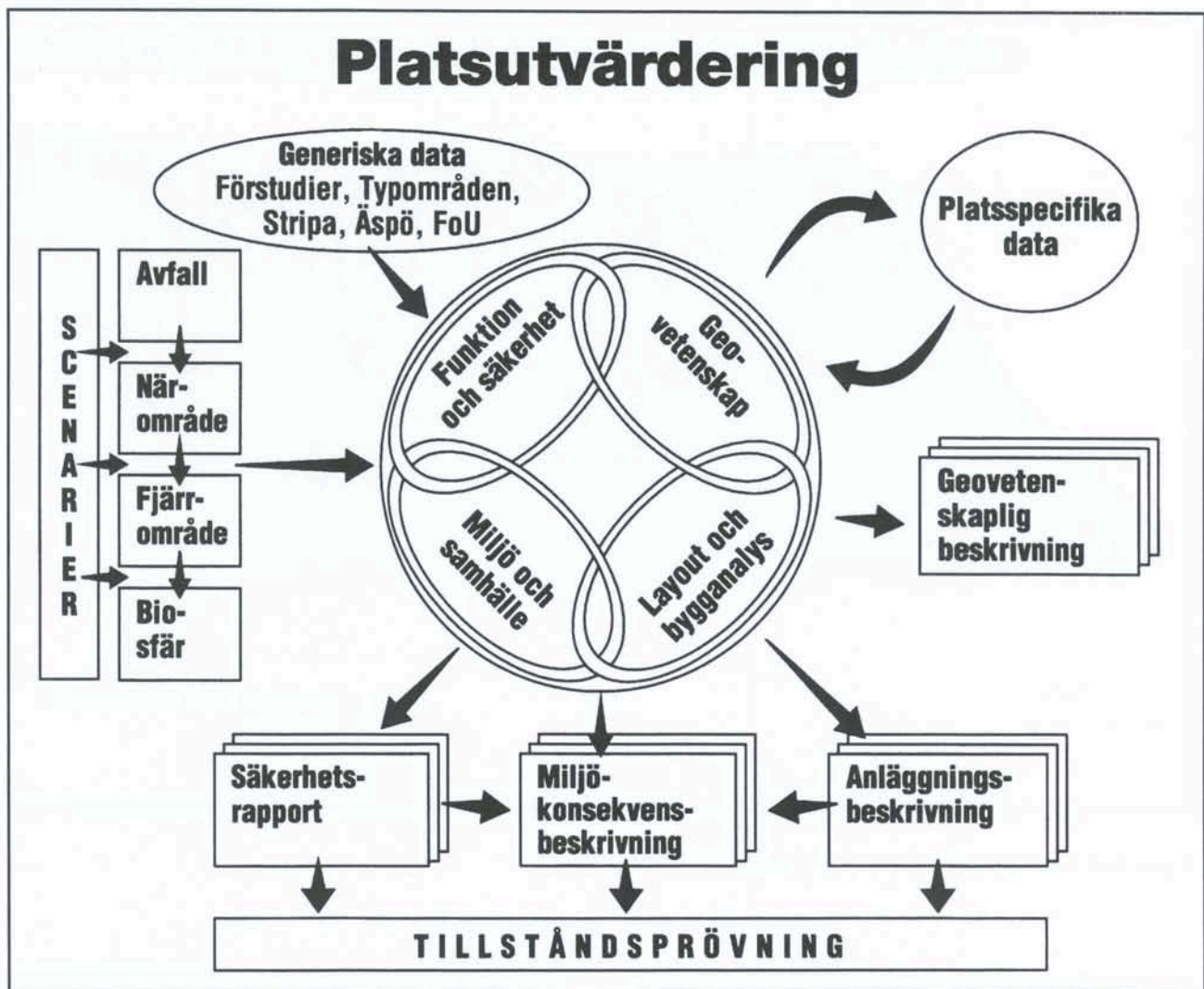
Som förberedelse till den egentliga platsundersökningen behöver man i ett första steg identifiera en lämplig plats av storleksordningen 5 km² inom områden som förstudien har indikerat som lämpliga för vidare studier, se Figur 9-5. Under detta steg görs bl a kompletterande regionala studier för att sätta in studieområdet i sitt regionalgeologiska sammanhang. Detta är ett arbete som också kan genomföras som en del av eller komplettering till en förstudie.

Därefter inleds ett andra steg som syftar till att bekräfta val av plats genom kartläggning av sprickzoner, bergartsgränser och andra geologiska förhållanden mot djupet. Reflektionsseismik och de första djupa undersökningsborrhningarna genomförs under detta steg med analyser/mätningar av grundvattenkemi, vattengenomsläpplighet och bergspänningar som viktiga nyckelparametrar. Projekteringsarbetet startar och preliminär funktions- och säkerhetsanalys genomförs. Förutsatt att de inledande undersökningarna och analyserna visar på lämpliga förhållanden fullföljs undersökningsprogrammet med kompletta platsundersökningar.

Komplett platsundersökning

Även steget komplett platsundersökning genomförs i ändamålsenliga delsteg, dels för att vissa undersökningar kräver ostörda förhållanden och dels för att ge tillfälle till såväl geovetenskaplig utvärdering som därpå baserade anläggningsutformningar, bygganalys och funktionsanalyser. För detta förutses genomförande i två steg enligt följande, se även Figur 9-6.

Steg 1 Syftar till att med ett borrh- och mätprogram verifiera och komplettera bilden av större sprickzoners och bergarters (särskilt gångbergarter) fördelning. Detta görs i första hand som underlag för en platsanpassad preliminär utplacering av förvarsdelar. På detta underlag anvisas lämpligt förvarsdjup. Vidare görs en



Figur 9-3. Omfattning av platsutvärdering.

preliminär beskrivning av mindre sprickzoners frekvens och egenskaper samt den övriga bergmassans egenskaper som underlag för beräkningar av grundvattenrörelsen.

Steg 2 Syftar till att med ett andra borrh- och mätprogram mera i detalj undersöka bergmassans egenskaper inom förvarsområdet samt besvara specifika frågor som identifierats under Steg 1.

Geovetenskaplig utvärdering

Den geovetenskapliga utvärderingen kommer att presenteras i form av modeller inom ämnesområdena geologi, hydrogeologi, grundvattenkemi och bergmekanik. Den utvärderings- och presentationsteknik som har utvecklats vid Äspölaboratoriet kommer därvid att vara vägledande. Beskrivningarna kommer att utvecklas successivt under platsundersökningarnas genomförande med konti-

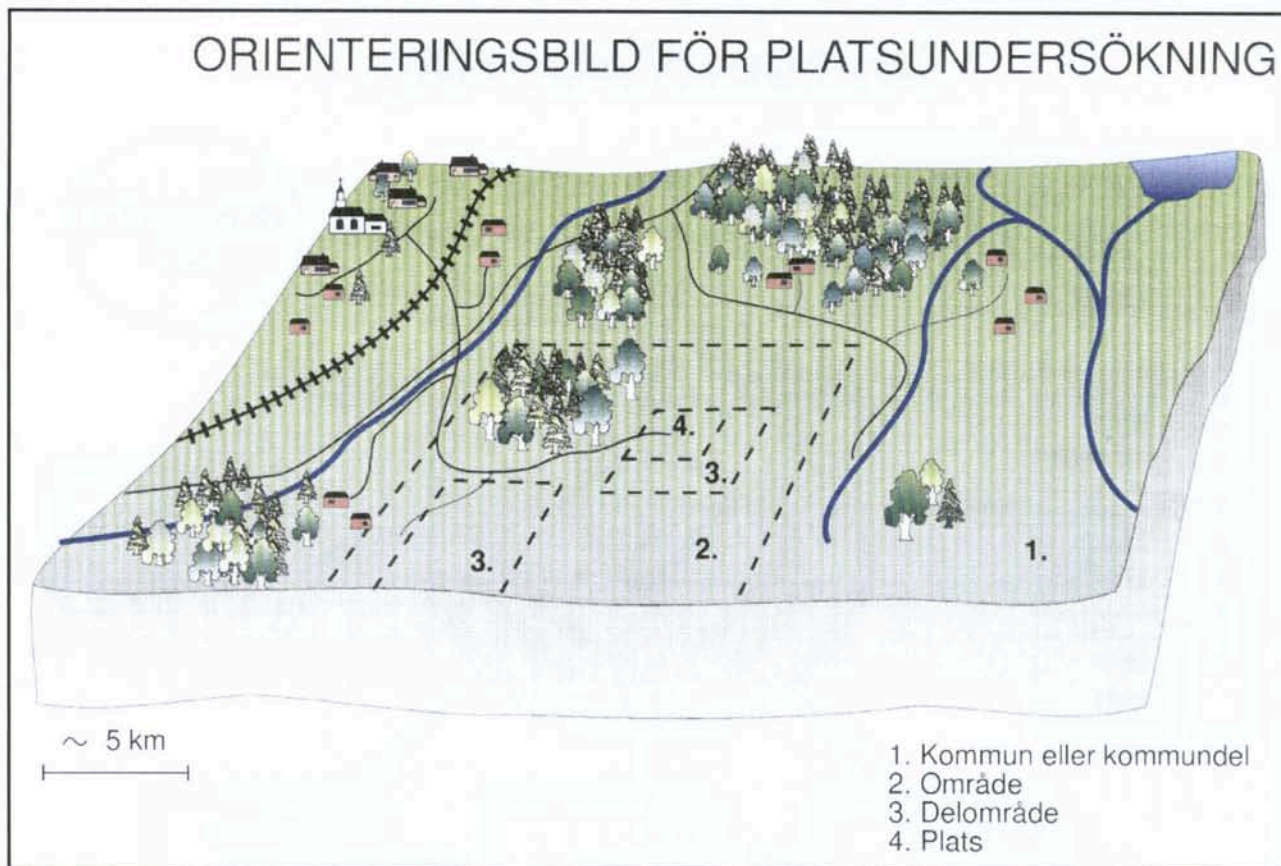
nuerlig återkoppling till planering och genomförande av nya undersökningssteg.

9.4.3 Metoder och instrument

I avsnitt 8.2 redovisas befintligt underlag vad gäller platsundersökningar och då speciellt avseende metoder och instrument i avsnitt 8.2.4. Erfarenheterna från tidigare platsundersökningar och då inte minst från Äspölaboratoriets förundersökningar har beaktats liksom erfarenheter från andra länder med likartade förhållanden och förutsättningar. Sammantaget är slutsatsen att SKB har tillgång till väl beprövad teknik och kunnande inför kommande platsundersökningar. Dock noteras också att på några områden pågår eller finns behov av ytterligare utvecklingsinsatser.

Planerat arbete avser inte endast fortsatt utveckling av metoder och instrument utan framförallt insatser för att

ORIENTERINGSBILD FÖR PLATSUNDERSÖKNING



Figur 9-4. Använda definitioner av geografiska begrepp.

effektivt och med hög kvalitet genomföra de geovetenskapliga undersökningarna. Eftersom undersökningen för djupförvar på flera områden kräver udda och/eller mera avancerad teknik än vad som finns tillgänglig på den vanliga geotekniska marknaden måste inte bara teknikutvecklingen utan också tekniktillgängligheten tas omhand av den som ansvarar för genomförande av djupförvaring. Av detta skäl har SKB sedan många år organiserat förrådshållning och service av instrument och mätsystem. Även vid låg intensitet på fältarbeten måste en viss underhållsnivå upprätthållas. Rutiner håller för närvarande på att ses över och förbättras inför kommande platsundersökningar.

Platsundersökningar på två platser parallellt förutsätter för de flesta mätmetoder två eller flera utrustningar av samma slag. Detta kommer att medföra nyanskaffningar under de närmaste åren. Vidare pågår modernisering av befintliga utrustningar för att öka deras tillgänglighet.

Nedan redovisas kortfattat några pågående och planerade utvecklingsinsatser. Andra kan tillkomma.

Ytgeofysik

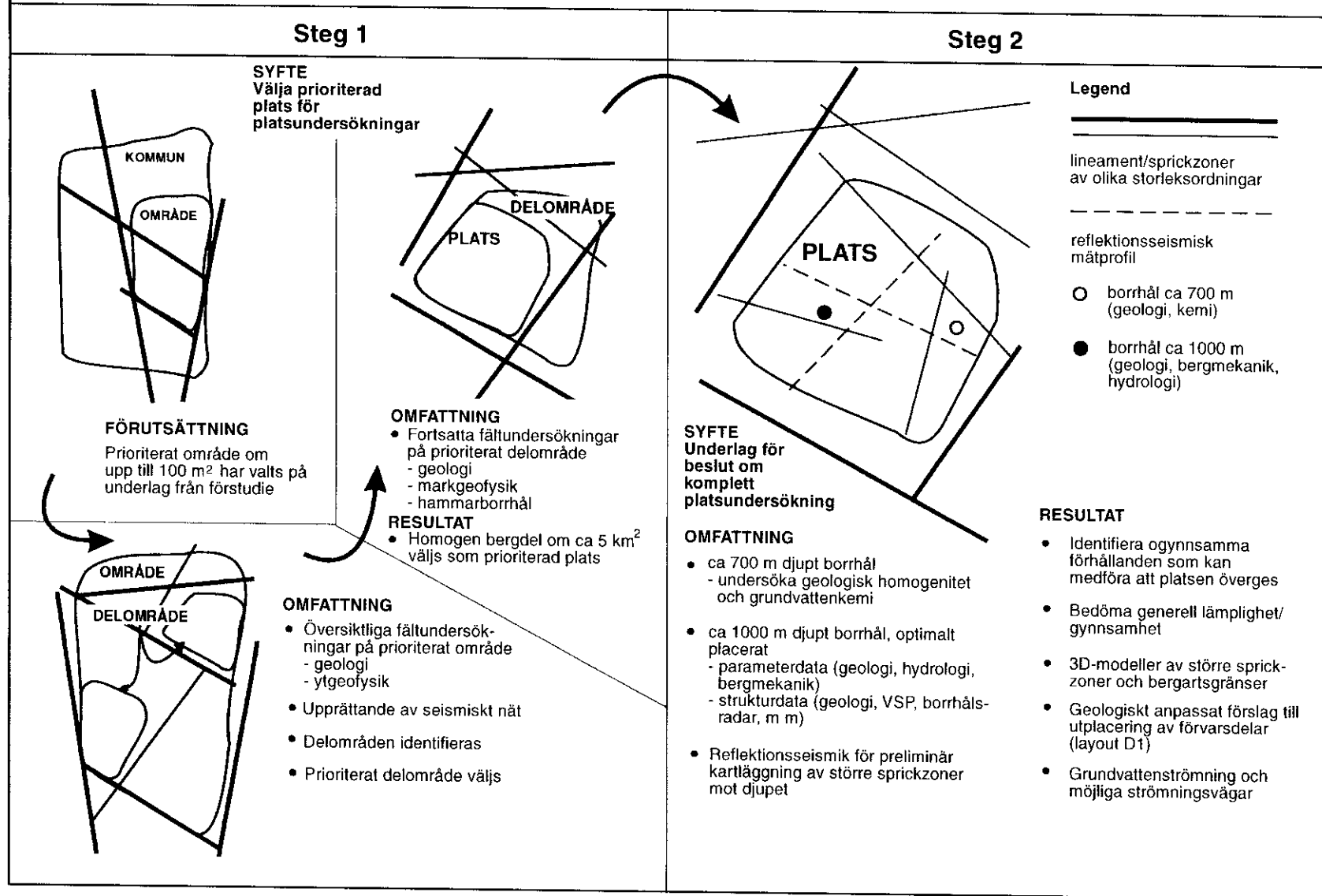
Ytgeofysikens roll vid de inledande platsundersökningarna är förhållandevis stor. Den kan även variera från

plats till plats beroende på de geologiska förhållandena. På platser med stort jordtäckte får man exempelvis förlita sig på geofysik i högre grad för identifiering av sprickzoner än då berggrundsytan är välblottad. För sub-horisontella zoner gäller att geofysik, och då främst reflektionsseismik, är enda sättet för identifiering innan borrhning inleds. Som nämndes i avsnitt 8.2.4 är det en metod där framstegs gjorts och där fältprovning i full skala är nästa planerade insats. Förutom reflektionsseismik planeras andra ytgeofysiska metoder såsom magnetisk gradiometri och regionala resistivitetskarteringar att genomföras inom samma fältstudie.

Inmätning

Inmätning av olika slag är centralt för geovetenskapliga undersökningar. Vad gäller geografisk positionering kommer GPS (Global Positioning System) att användas i platsundersökningarna. Tekniken är under frammarsch och görs mer och mer kommersiellt tillgänglig för olika tillämpningar. Dess potentiella nytta för SKB är förknippad med utsättning av mätprofiler, koordinatsättning av mätpunkter, inmätning av borrhål m m. Metoden avses provas i samband med de ovan nämnda ytgeofysiska fältstudierna.

INLEDANDE PLATSUNDERSÖKNING



Figur 9-5. Idéskiss till omfattning avseende inledande platsundersökning.

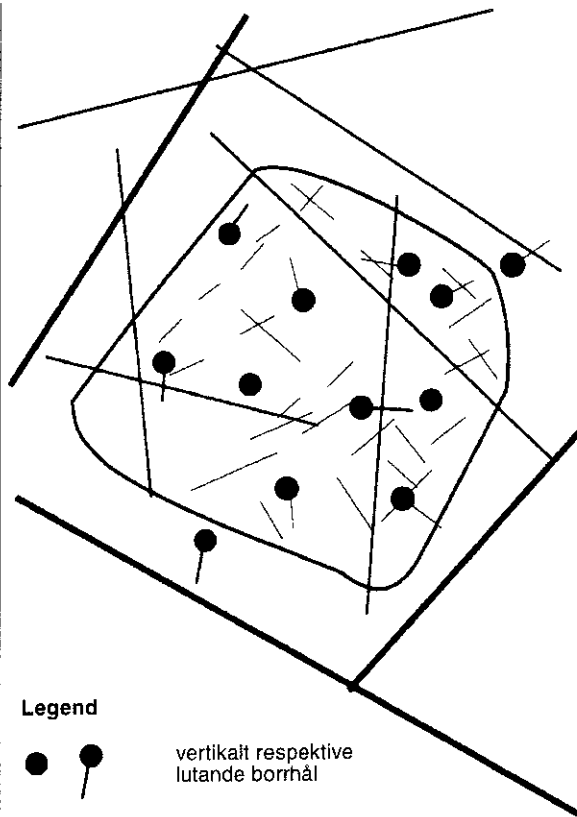
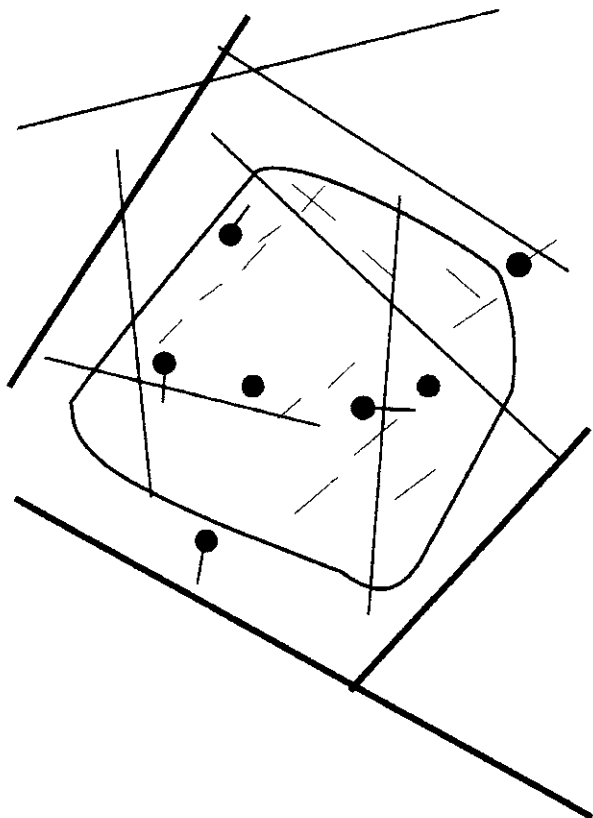
KOMPLETT PLATSUNDERSÖKNING

Steg 1

Steg 2

SYFTE

Underlag för eventuell ansökan om detaljundersökning



OMFATTNING

- Borrprogram
 - fastställa utbredning och egenskaper hos bergarter, inklusive gångbergarter
 - fastställa läge och egenskaper för sprickzoner av större betydelse
 - fastställa frekvens och egenskaper för sprickzoner av förhållandevis mindre betydelse

RESULTAT

- Underlag för funktionsanalys och projektering
 - platsanpassad preliminär utplacering av förvarsdelar (layout D2)
 - fastställa förvarsdjup, tunnel/schakt, påslagsplats (om ej tidigare gjort)
 - genomföra bygganalys
- Underlag för grundvattenmodellering
 - strömningstider för olika modelltolkningar
 - identifiering av utströmningsområden

Legend

- • vertikalt respektive lutande borrhål
- — — sprickzoner av varierande storlek/betydelse

OMFATTNING

- Borrprogram
 - fördjupad kunskap och ökad säkerhet för parameterdata för bergarter och strukturer (utbredning, egenskaper, m m)
 - mäta in-situ grundvattenströmning
- Regional omgivning
 - kompletterande undersökningar för kontroll av grundvattenmodell
- Särskilda frågor
 - kompletterande utredningar och studier

RESULTAT

- Underlag för funktions- och säkerhetsanalys och projektering
 - variationsanalyser för långsiktig säkerhet för olika modellalternativ och parameterintervall
 - justerad platsanpassad preliminär förvarslayout

Figur 9-6. Idéskiss till omfattning avseende komplett platsundersökning.

Borrteknik

I avsnitt 8.2.4 noterades att borrning genom svaghetszoner är ett område där tekniken behöver förbättras. Nästan utan undantag gäller som grundförutsättning att inga stabiliserande tillsatser till spolvätskan accepteras vid borrningar i en platsundersökning. Avsteg från denna grundförutsättning måste dock ibland göras för att kunna fortsätta borrningen. Hittills har då främst cementering använts. Det finns även idéer om andra sätt att komma tillrätta med detta instabilitetsproblem. En inventering och förstudie av dessa borrhåstekniska frågor pågår. Målet är att finna standardlösningar för olika stabilitetsproblem och för olika krav på vilka störningar som kan accepteras.

Dokumentationen av borrhåsarbetet och registrering i samband med borrning, liksom av borrhålet som sådant ska effektiviseras. Borrhåsarbetet ger en stor mängd kringinformation som rätt dokumenterad kan hjälpa till att bringa klarhet i frågor av olika slag.

Tester under borrning

Hydrauliska tester och vattenprovtagning under borrning provades under Äspöprojektets förundersökningar. Tekniken kommer att ses över och förbättras, inte minst vid borrning med wire-line. Störst förbättring torde kunna uppnås för vattenprovtagningen, där provtagning av ostörda prover eftersträvas.

Hydrologisk dokumentation och hydrauliska tester

Ett hydrogeologiskt undersökningsprogram omfattar flera mät-, test- och monitoringsmetoder. Några instrument och metodfrågor bör ytterligare studeras, provas eller utvecklas för att optimera detta undersökningsprogram med avseende på mätdatas representativitet och resursbehov.

För bestämning av hydraulisk konduktivitet utförs hydrauliska injektionstester med SKBs multivagnar. För att uppfylla krav på tillgänglighet måste dessa moderniseras till en viss grad. En enklare metod för bestämning av hydraulisk konduktivitet, som kanske kan minska omfattningen av de relativt tidskrävande injektionstesterna, har utvecklats i Finland. Denna metod kommer att studeras ytterligare, bl a planeras provning i något av SKBs borrhål. Vidare har tillverkningen av ett nytt rörgångssystem för pumptester och injektionstester nyligen inletts.

Salthaltens inverkan på mätningar av hydrauliska egenskaper har aktualiserats genom de mätningar som har gjorts i borrhål KLX 02 vid Laxemar, Oskarshamn. I detta borrhål finns grundvatten med en salthalt på upp till 8% vilket ökar vattnets densitet så markant att det påverkar både testutvärdering och testgenomförande. Eftersom höga salthalter kan förekomma på andra platser belägna under högsta kustlinjen, se Figur 5.5-5, skall under de närmaste åren mät- och utvärderingsmetoder utvecklas så att eventuella platsundersökningar i dessa områden kan hantera sådana förhållanden.

Metoden för flödesloggning under pumpning kommer att modifieras något, bl a för att ge bättre data vid stora densitetskontraster. Vidare planeras användning av en noggrann absoluttryckssond för att få bättre klarhet i de hydrauliska drivkrafterna.

Utspänningsmetoden med borrhålssond för in-situ-mätning av grundvattenflöde kommer att provas och utvärderas, liksom en annan mätteknik, som utvecklats i Finland, för samma syfte.

Grundvattenmonitoring kan utföras på flera sätt. Den metod som utvecklades för Äspölaboratoriet kommer att utvärderas grundligt innan det bestäms vilken metod som ska användas vid platsundersökningarna.

Längdkalibrering av borrhål

Betydelsen av exakt inmätning av mätpunkter nämndes tidigare. Exakt koordinatsättning i borrhål kräver både inmätt borrhålskrökning och inmätt djup (borrhålslängd) till mätpunkten med stor noggrannhet. För att bättre kunna jämföra och samutvärdera olika mätparametrar krävs större noggrannhet på längdmätningen än vad som är fallet i dag. Som nämndes i avsnitt 8.2.4 pågår utvecklingen av ett längdkalibreringssystem där borrhålen i samband med borrning märks med ringar på valda djup. Mätutrustningarna förses med sensorer för att detektera dessa ringar. Arbetet kommer att fortsätta med framtagning av ringsättningsverktyg för 56 mm borrhål, integrering av detektorer på mätutrustningarna samt intrimning av metodiken.

Borrhålsgeologi och geofysik

Baserat på SKBs nya borrhåls-TV-system (avsnitt 8.2.4) kommer nya rutiner för borrhålsgeologisk dokumentation att utvecklas, där kärnkartering och geofysik integreras.

9.4.4 Datahantering och kvalitetssäkring

En effektiv databas är av central betydelse för administration och kontroll av data. Utvecklingen av SKBs centrala geodatabas (SICADA) avslutas i allt väsentligt under 1995. Kvalitetssäkringen av data är intimt förknippad med en effektiv databas, men för den skull inte ensam garant för detta. I avsnitt 8.2.6 diskuterades kvalitetssäkringens huvudmotto "att göra rätt saker", "på rätt sätt" och med fullgod dokumentation.

Ett "Kvalitetsprogram för platsundersökningar" kommer att vara det samlade kvalitetssäkringsdokumentet som specifikt reglerar kvalitetsrutinerna inom detta område. Dokumentet föreligger i ett första koncept. För platsundersökningar kommer datasäkring och spårbarhet av data liksom effektiva dokumentations- och rapporteringsrutiner att vara av väsentlig betydelse.

Kvalitetssäkringen kommer att integreras i ordinarie program och planer. Vid platsundersökningen, oavsett vad det gäller, ska den person som genomför arbetet

också svara för att det har blivit utfört på rätt sätt (d v s enligt instruktion) och att det redovisande dokumentet och/eller datamängden också har kontrollerats. Avvikelser och fel ska dokumenteras. Stickprovskontroller och kvalitetsrevisioner kommer att göras. Tydliga regler för ansvar och befogenheter i organisationen är andra viktiga kvalitetsaspekter.

För vissa instruktioner kommer manualer som utarbetats inom Äspölaboratoriet att användas direkt eller med smärre justeringar. I andra fall måste nya utarbetas. En annan komponent av kvalitetssäkringen är den tekniska dokumentationen av utrustningar och datorprogram. För administrativ ordning av alla manualer och tekniska dokumentationer har ett bibliotekssystem för detta upprättats, SKB MD (metod-dokumentation).

9.5 PROJEKTERING

Projekteringen av djupförvarets utformning syftar till att uppnå en optimal funktion med hänsyn till säkerhet, miljö och teknik. SKB har påbörjat projekteringsarbetet genom att utarbeta generella anläggningsbeskrivningar, som ger exempel på några möjliga sätt att utforma djupförvaret (avsnitt 8.1.1). Till stor del kan projekteringsarbetet baseras på erfarenheter från kärntekniska anläggningar och undermarksprojekt. Det finns emellertid frågor eller krav som speciellt rör ett djupförvar, vilka kräver särskilda insatser.

9.5.1 Förutsättningar

Planen för projektering av djupförvaret baseras på ett antal förutsättningar som tekniska principer, krav på förvaringsplatsen etc enligt följande:

- avfallet kapslas in på annan plats och avfallskollin transporteras till djupförvaret,
- sammanlagd vikt på kolli och transportskydd är under 100 ton,
- kolli med transportskydd transporteras ner under jord och transportbehållaren öppnas först där,
- avfallsenheterna deponeras i kristallint berg på cirka 500 m djup,
- tillredning och andra byggnadsarbeten under jord kan ske med konventionella metoder och under användande av konventionella byggmaterial,
- kraven på standarden på miljö och arbets säkerhet under jord är jämförbar med de som ställs i andra undermarksprojekt.

9.5.2 Projekteringsprocessen

Planeringen bygger på att projektering genomförs i definierade steg såsom presenterades i FUD-program 92, kompletterande redovisning /9-2/. Den där redovisade uppdelningen i projekteringskedan påverkas i viss mån

av att lokaliseringssprövningen för djupförvaret sker redan efter genomförda platsundersökningar. Detta gäller bland annat en tidigare start av bygge av ovanjordsanläggningarna. Utbyggnaden av djupförvaret görs etappvis och detaljprojekteringen av olika områden i anläggningen utförs i överensstämmelse härmed med viss förskjutning i tiden i samband med att lösningar och utformning m m läses som underlag för investeringsbeslut.

Följande indelning i projekteringskedan används:

Förstudie (Skede E)

Den s k Anläggningsbeskrivningen utgör det första samordnade förslaget till utformning av djupförvaret och ska läggas till grund för den fortsatta projekteringen. Den ska också utgöra en av förutsättningarna för val av bergbrytningsteknik, utarbetande av förslagshandlingar för berg- och byggnadsarbeten samt utarbetande av systemfunktionsprogram för layoutstyrande system inom underjordsanläggningen såsom ventilation, bergdränage och elförsörjning. Anläggningsbeskrivningen anger också förutsättningar för utformning av maskiner och fordon.

Alla layoutstyrande alternativ eller dellösningar utvecklas till detaljeringsgrad E för att senare kunna detaljeras till nivå D, om inte alternativet dessförinnan kunnat avfärdas som mindre intressant. Den kompletta uppsättningen av anläggningsbeskrivningar i detaljeringsgrad E läggs till grund för beslut om fortsatt projektering.

Projektering (Skede D)

Detta skede planeras omfatta två avgränsade etapper enligt följande:

Första fasen, som förutses kunna starta ca 1,5 år efter det att platsundersökningar på platsen inletts, omfattar geografiskt och geologiskt anpassade förslag till anläggningsutformningar. Typ av nedfart till förvaringsnivå väljs med hänsyn till de aktuella platsernas förutsättningar. Erforderligt driftområde ovan jord anpassas till de lokala förutsättningarna. Resultatet består av situationsplaner över och under jord samt layout över tunnelsystemet inklusive nedfarter. Enskilda byggnader och motsvarande studeras ej.

En andra fas som bedöms kunna starta ca 3 år efter det att platsundersökningar inletts på platsen omfattar preliminär lösning av anläggningens utformning anpassad till angiven plats. Den preliminära lösningen utgör en bearbetning av resultatet från tidigare arbete och bygger bland annat på preliminära drift- och dimensioneringsuppgifter. Undersökningsverksamhetens behov beaktas. Layoutritningarna utarbetas som definierar varje anläggningsdel i fråga om funktion, utförande och samband. Resultatet läggs till grund för preliminära huvudhandlingar inklusive preliminära sprängningsritningar. Detta material ingår som en del av underlaget för ansökan om tillstånd för detaljundersökning och bygge.

I ett framtida läge, när beslut aktualiseras om utbyggnad av deponeringsområden görs som första åtgärd en revidering baserad på uppnådda resultat som underlag för vidare projektering.

Konstruktion (Skede C)

Detta skede syftar till en definitiv anläggningsutformning. Anläggningen anpassas till slutliga drift- och dimensioneringsförutsättningar.

Skyddskraven ska vara fastställda och beaktade. Industriområdet ovan jord skall vara väl inordnat i terrängen och anknuten till aktuell infrastruktur. Anläggningen skall vara utformad i samråd med berörda myndigheter. Resultatet från detta skede skall läggas till grund för upphandling av byggnads- och bergarbeten och olika system samt utarbetande av huvudhandlingar och bygghandlingar.

Detaljkonstruktion (Skede B)

Skede B syftar till en slutgiltigt fastställd planlösning samt utarbetande av arbetshandlingar för byggnation, tillverkning och montage.

Dokumentation (Skede A)

Skede A redovisar slutdokumentationen som underlag för tillstånd till driftstart.

9.5.3 Planerade projekteringsinsatser fram till ansökan om lokalisering och utbyggnad för detaljundersökning

Arbetet bedrivs för närvarande för olika delar av djupförvaret med den uppdelning som redovisades i FUD-program 92 och som sedan detaljerats något mer genom definition av olika "moduler", såsom framgår av Figur 9-7. Avsikten är att olika tekniska lösningar skall kunna utredas för respektive modul, så att en "bygglåda" skapas med byggstenar för den kommande platsanpassade projekteringen. Beroende på lokala förutsättningar kan olika tekniska lösningar blir aktuella för olika platser.

Arbetet omfattar följande delar:

- Program, layout och konstruktionsarbete avseende mark, byggnader och berggrum. Projekteringsarbete avseende hissar och lyftanordningar.
- Projekteringsarbete avseende system (el, ventilation, etc).
- Projekterings- och konstruktionsarbete avseende maskiner och fordon.

- Genomförande av speciella utredningar av betydelse för djupförvarets utformning och konstruktion.

En förutsättning för start av en platsanknuten projektering är att följande val kan göras för respektive plats som skall studeras:

- deponeringsmetod,
- nerfartsalternativ,
- bentonitbarrärens utformning och applikation,
- transportsystem till deponeringsnivån,
- drivningsmetod av tunnlår,
- diesel- eller eldrift för maskiner och fordon.

I huvudsak kommer arbetet med en platsanpassad layout först att bestå av att kombinera och anpassa valda moduler till en helhetslösning för varje studerad plats. Senare när det finns mer omfattande underlag från kompletta platsundersökningar utarbetas detaljerade helhetslösningar. Förutom platsspecifika data styrs projekteringen av systeminformation samt resultat från säkerhetsgranskning.

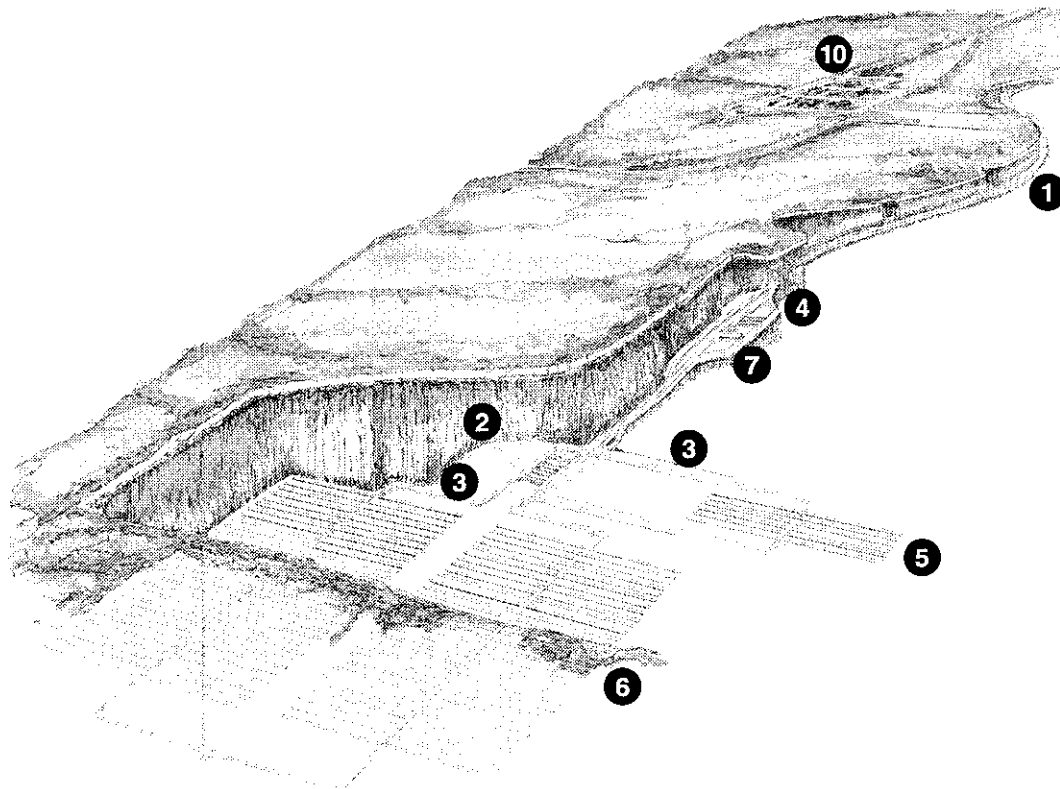
Behovet av maskiner och fordon har identifierats i samband med de anläggningsbeskrivningar som tagits fram. Respektive maskintyp och fordonstyp har studerats med avseende på tänkt funktion. Avsikten är att resultatet av dessa studier skall ge utgångspunkterna för erforderliga konstruktionsinsatser. Projekteringsarbetet för maskiner och fordon bedrivs därefter stegvis i överensstämmelse med arbetsmodellen för projektering. Preliminära uppgifter av betydelse för förvarets övergripande utformning och funktion är utrymmesbehov, rumsprofiler, samband med annan utrustning och försörjningssystem.

Den beskrivna projekteringsmodellen för djupförvaret innebär att arbetet med anläggningens utformning följer ett traditionellt mönster med tillämpning av konventionell och beprövad teknik.

Fram till dess att platsundersökningarna startar baseras projekteringsverksamheten på aktuella anläggningsbeskrivningar, generella data om svensk berggrund samt information från undersökningar av olika typområden. Verksamheten under de närmaste åren har följande syften:

- utgöra underlag för val av bästa generiska, tekniska lösningar,
- utgöra underlag för den platsspecifika utformningen,
- medverka till begränsning av antalet alternativ inför fortsatta studier,
- identifiera faktorer som kan påverka lokal placering av djupförvaret samt planerad geovetenskaplig karakterisering av bergvolymen för djupförvaret.

Målsättningen är att redan i ett tidigt skede välja bort alternativ som inte bedöms intressanta. Viktiga konkreta



Planerad modulindelning:

1. Nerfart till förvarsnivå.
2. Centralområde under jord.
3. Transporttunnlar till deponeringsområdet för använt bränsle.
4. Transporttunnel till deponeringsområde för annat långlivat avfall.
5. Deponeringsområde för inledande drift.
6. Deponeringsområde för reguljär drift.
7. Deponeringsområde för annat långlivat avfall.
- (8). Undersökningsverksamheten.
- (9). Infrastystem.
10. Ovanjordsanläggning.

Figur 9-7. Modulindelning av djupförvaret.

mål är val av typ av nerfart till deponeringsnivån och deponeringsmetod.

I utredningar presenteras intressanta alternativ och olika typer av beslut och rekommendationer på ett sätt

som möjliggör senare granskning. I Tabell 9-1 anges utredningsfrågor som är eller kan bli aktuella.

Tabell 9-1. Aktuella frågor för utredningar.

Skede E

Alternativa delprinciplösningar

Deponeringsmetoder.
Nertransport av avfallsbehållare i ramp.
Transport av avfallsbehållare på nivå.
Tillredningsmetoder.

Utredningsfrågor där en ståndpunkt, prioritering eller val behöver analyseras

Design av olika förvarsområden.
Infrasystem.
Skyddsfrågor.
Materialutveckling.
Byggmetoder och byggnadstekniska lösningar.
Kvalitetssäkring.
Safeguard.

Dimensioneringsförutsättningar

Avfallstyper.
Processbeskrivning.
Teknisk standard.
Mekanisk utrustning.

Skede D

Utredningar som kan aktualiseras:

Utredningsfrågor där en ståndpunkt, prioritering eller val behöver analyseras

Design av olika förvarsområden.
Infrasystem.
Skyddsfrågor.
Materialutveckling.
Byggmetoder och byggnadstekniska lösningar.

Dimensioneringsförutsättningar

Processbeskrivning.
Teknisk standard.
Mekanisk utrustning.

9.6 TEKNIK FÖR BYGGE, DRIFT OCH FÖRSLUTNING AV DJUPFÖRVARET

Bygge, drift och förslutning av djupförvaret kan till betydande del utformas utifrån känd teknik och erfarenhet inom kärnkraftindustrin och undermarksanläggningar. Det finns emellertid behov av anpassning eller ut-

veckling av tekniken med hänsyn till de krav och förhållanden som gäller för djupförvaret.

9.6.1 Bygge

De olika bergbyggnadsmetoder som kan komma till användning i djupförvaret är väl utvecklade med hänsyn till den säkerhet som behövs för att tunnlar och bergrum skall utgöra trygga arbetsplatser för personalen.

Analyser, värdering och jämförelse av olika byggmetoder genomförs som en del av projekteringsprocessen. Olika byggmaterials påverkan på ett djupförvars mekaniska stabilitet, kemiska förhållanden och hydrauliska egenskaper undersöks med sk bygganalys.

Utvecklingen av en bygganalysstrategi kan indelas i några olika steg enligt följande.

- sammanställning av krav vid projektering och byggande,
- genomgång av viktiga faktorer ur byggsynpunkt,
- prognostiserbarhet för dessa faktorer,
- verifiering.

Viktiga faktorer som behandlas inom bygganalysen omfattar:

- Mekanisk stabilitet:
 - Lastfall.
 - Strukturkontrollerad instabilitet.
 - Passage av svaghetszoner.
 - Smällberg.
- Grundvatten:
 - Bergegenskaper.
 - Vatteninläckning i samband med drivning.
 - Grundvattentryck.
 - Grundvattenavsänkning.
 - Korrosion på installationer.

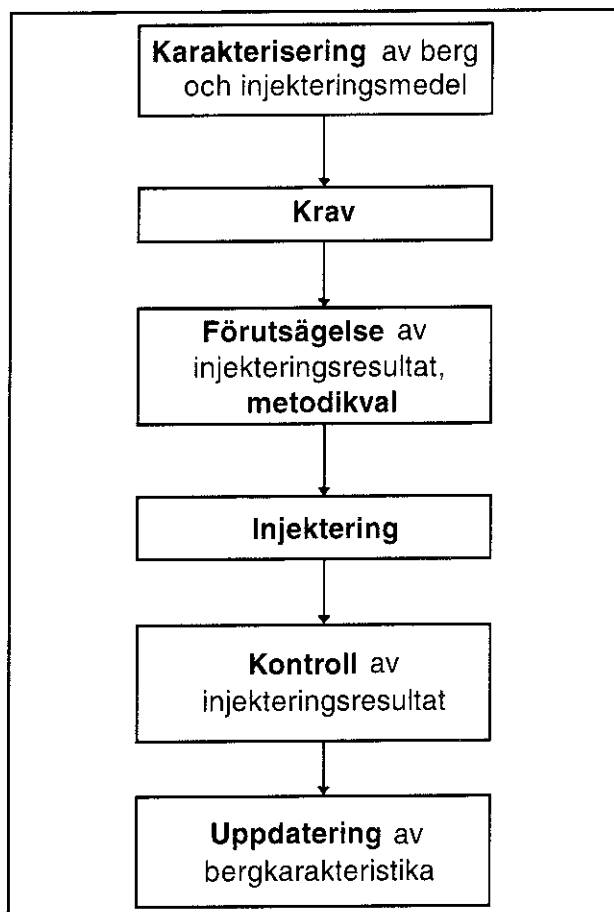
Bygganalysen kommer i vissa delar att verifieras genom att jämföra vad analysen prognostiserar med observationer i Äspölaboratoriet.

Injektering

Kunskap om metoder för injektering av sprickor för att förhindra större vatteninflöden till djupförvaret behöver fördjupas. Dagens kunskap bygger till stor del på praktiska erfarenheter medan det är sämre ställt med den teoretiska förståelsen.

Planerade insatser rörande injektering syftar till en ökad förståelse av betydelsefulla faktorer och storleken på ingående parametrar samt modellering av injekteringsprocessen. Verifiering sker genom försök under realistiska förhållanden i Äspölaboratoriet.

En annan viktig uppgift för de närmaste åren är att utarbeta en genomförandestrategi för passage av starkt vattenförande sprickzoner på förvarsdjup.



Figur 9-8. Delmoment i injekteringsstudierna.

De praktiska åtgärder som erfordras vid passagen av dessa med schakt/ramp/tunnel är dels tätning mot vatteninflöde, dels förstärkning så att passagen förblir stabilt. Vanligen behövs i sådana fall också efterinjektering som en del i den permanenta förstärkningen. Kraven på material bestäms i första hand av kraven att över huvud taget lyckas med injekteringen, d v s snabb härdning och hög hållfasthet, och i andra hand av kraven på begränsad kemisk påverkan på djupförvaret. Respektavståndet från kapslar med använt bränsle bestäms bl a med hänsyn till detta.

Mindre men starkt vattenförande sprickzoner torde ej medföra allvarliga problem för den mekaniska stabiliteten. Inom deponeringsområdet blir emellertid materialmängd och materialtyp betydelsefulla liksom kontrollen av spridningsområdet.

Fina, diskreta sprickor är ej mekaniskt betydelsefulla men kan föra vatten och kan därför behöva injekteras för att åstadkomma tillräckligt låga vatteninflöden under deponering och öppethållande. Vid hög radonhalt i grundvattnet behöver inläckaget begränsas för att inte behovet av ventilationsluft skall bli för stort.

Oavsett typ av spricka/sprickzon planeras injekteringsarbetet utföras i de steg som schemat i Figur 9-8 illustrerar.

9.6.2 Utveckling av maskiner och utrustningar

De flesta arbetena i djupförvaret kan utföras med maskiner eller utrustningar som finns på marknaden i standardutföranden. I några fall är emellertid kraven så speciella att särskilda konstruktioner först måste tas fram och prototyper eventuellt utprovas innan de kan byggas för användning i djupförvaret. Detta kan vara fallet när det gäller:

- kortbyggd tunnelborrmaskin (TBM) ifall fullborring av deponeringstunnlar väljs och flexibiliteten i layouten skall bibehållas,
- borrhning av deponeringshål,
- spårbundet transportsystem i ramp om spårbunden princip väljs,
- truck för transport i ramp om spårfri princip väljs,
- spel för de tunga transportererna i schakt ifall schaktalternativet väljs,
- lyftok för olika avfallsenheter och för olika platser i djupförvaret,
- transportfordon för använt bränsle på deponeringsnivån,
- deponeringsfordon för använt bränsle,
- bentonitfordon ifall kapsel och bentonit hanteras var för sig,
- återtag av kapsel efter det att deponering och återfyllning gjorts,
- friläggning av deponerad kapsel efter det att bentonitbufferten vattenmättats.

Den generella utvecklingsplanen för maskiner och utrustning som följs under den kommande sexårsperioden (1996-2001) omfattar följande steg:

Förstudier (Skede E)

- Idéskisser.
- Utvärdering och jämförelse av olika transport- och deponeringssystem samt begränsning av alternativ.

Platsundersökningsskedet (Skede D)

- Preliminär dimensionering.
- Konstruktion av arbetsmodell i skala, t ex 1:10.
- Utprovning av modellen.
- Förstudie av delsystem för bedömning av utvecklingsbehov.

Konstruktion, tillverkning och prov av prototyper till maskiner och utrustningar bedöms med något undantag inte starta förrän under nästa sexårsperiod. Dagsläge och vad som planeras under den kommande sexårsperioden beskrivs nedan för de maskiner/utrustningar som speciellt behöver tas fram för djupförvaret.

TBM

I det fall en kortbyggd maskin behövs, kan en sådan konstrueras på basis av nuvarande idéskiss. En första åtgärd är preliminär dimensionering av utrustningen. Maskintyp aktualiseras tidigast inför starten av djupförvarsbygget och torde då kunna konstrueras och tillverkas för direkt användning i djupförvaret utan mellanliggande modell- och prototyp tester.

Borrmaskin för deponeringshål

En utrustning har provats i fullstor skala i borrhålen i Olkiluoto /9-9/ och en maskin för produktionsborrning bedöms möjlig att konstruera och tillverka på basis av hittills vunna erfarenheter. Under perioden görs en preliminär studie i syfte att analysera utrymmesbehovet för maskinen och hur den påverkar deponeringstunnels storlek.

Lyftok

Under den kommande sexårsperioden inventeras behovet och standardiserade konstruktioner tas fram. Eventuellt tillverkas och provas enheter i modellskala.

Spårbunden transport i ramp

Idéskiss till system finns om denna lösning förordas. Eventuellt genomförs prov i modellskala.

Spårfri transport i ramp

Idéskiss till truckutförning finns. Modellförsök med truck bedöms ej behövas. Möjligen kan modellförsök med lastning och lossning av transportbehållare behövas genomföras under sexårsperioden.

Spel i schakt

Spel för de aktuella lasterna finns ej i standardutförande idag. Dessutom tillkommer särskilda krav på extra bromssystem, som behöver konstrueras. Utvecklingen, om transport i schakt av avfallskollina väljs, kommer att följa de ovan skisserade stegen utgående från de principiella lösningar som hisstillverkare presenterat. I Tyskland har prov genomförts med en spelprototyp som visar på goda förutsättningar för konstruktion av utrustning som uppfyller kraven från djupförvaret. Erfarenheterna från detta arbete kan eventuellt minska behovet av modell- och prototyp tester.

Transportfordon på deponeringsnivån

Referenskonceptet är att ett speciellt fordon används för transport av avfallskollina på deponeringsnivån, men andra alternativ som innefattar samma fordon från markytan fram till deponeringsplatsen kan också tänkas. Oavsett val av system behöver idéskisser utvecklas till preliminära dimensioneringsritningar. Delsystemen för lyft och dockning till deponeringsmaskinen kan eventuellt behöva provas i modellskala, vilket i så fall görs under sexårsperioden.

Deponeringsfordon

Detta fordon skall forsla avfallskollin från transportbehållaren till förvarspositionen och torde vara den mest komplexa av djupförvarets maskiner. Flera av delsyste- men bedöms behöva testas var för sig innan hela maskin- enheten byggs, men omfattningen av testerna skall först analyseras, vilket planeras ske under sexårsperioden.

Bentonitfordon

Fordonet skall först hantera bentonitringarna innan kapseln placerats på sin plats, och därefter de block som placeras ovanpå den deponerade kapseln. Utvecklingen drivs parallellt med utvecklingen av deponeringsfordo- net.

Maskiner för återtag

Cykeln för återtag efter vattenmättnad och svällning av bentonitbufferten omfattar först friläggning av kapseln och därefter greppning och uppspelning samt eventuellt rensning av kapseln från bentonit och placering i en transportbehållare. För detta behövs en ny enhet för friläggning av kapseln. För deponeringsfordonet krävs endast ett utbytbar lyftok. Transportbehållare och trans- portsystem för återtag bedöms kunna utgöras av de en- heter som används vid deponeringen.

9.6.3 Applicering av buffert och åter- fyllning

Bentonitbufferten runt kapslarna är planerad att appliceras i blockform. Efter deponeringen sväller bentoniten vid bevätning och fyller ut hela utrymmet mellan kapsel och bergvägg. Tekniken för blockpressning är under utveckling.

Återfyllningen av deponeringstunnlarna är i referens- konceptet planerad att utföras med in situ-kompaktering av utlagda lager av återfyllnadsmaterial. Ett problem

som uppmärksammades i Stripaprojektet är att metoder behöver utvecklas för kompaktering av återfyllnadsmaterialet mot tunnelns tak.

Utveckling av metod för pressning av bentonitblock

Det fortsatta arbetet med uppskalning av blockpressningstekniken planeras först koncentreras på enaxlig pressning av stora block som kan ha både segmentform eller full diameter på 1,5 á 1,6 m. I en första etapp utvecklas tekniken för block med en diameter på ca 1,0 m. Detta planeras ske med en specialtillverkad form som används i en befintlig press i en verkstad i Ystad. Denna press har också kraft nog för att pressa fullstora block i en senare etapp.

Förutom bedömning av blockens lämplighet för hantering och användning i djupförvaret klargörs också eventuella ojämnheter i blocken som beror på den enaxliga presstekniken.

Den vid Stripaförsöken använda isostatpressningstekniken kommer också att utredas, så att den kan jämföras med den enaxliga presstekniken. Sannolikt behöver också isostatpressningsteknik provas på fullstora block för att detaljerad jämförelse av metoderna skall kunna göras.

Oavsett pressningsteknik återstår det att fastställa förpacknings- och hanteringsteknik för de pressade blocken. Detta arbete sker parallellt med utvecklingen av presstekniken.

Utveckling av metod för återfyllning

Olika metoder för inplacering och packning av återfyllnadsmaterial i tunnlar planeras att testas i fullstor skala i Äspölaboratoriet. Följande material planeras användas:

- okrossade TBM-massor,
- krossade TBM-massor,
- blandningar av krossade TBM-massor och bentonit i proportioner om 10, 20 och 30% bentonit.

Den huvudsakliga packningstekniken är vibratorpackning av horisontell lager och upp mot taket av lutande lager. Även inplacering av förkompakterade block av blandningar med 30% bentonit överst mot taket avses att prövas.

Packningsegenskaper, hydrauliska egenskaper och kompressionsegenskaper hos dessa material testas i laboratoriet för optimering av teknik och kvalitet samt prediktering av resultaten av fältprovningarna.

9.6.4 Förslutning

Fyra olika krav ställs på förslutning och pluggning för olika behov i djupförvaret:

- förhindra eller starkt begränsa strömning av vatten i själva tunneln,
- begränsa det axiella flödet i den störda zonen runt tunnlar och schakt,
- förhindra eller starkt begränsa strömning av vatten i borrhålets undersökningshål,
- försvåra obehörigt intrång i till förvaret.

Programmet för den kommande sexårsperioden (1996-2001) omfattar följande:

Tätning av tunnel

Två principer för tätning av tunnlar kommer att studeras under den kommande sexårsperioden: proppar av bentonit/bergballast samt betongpluggar med O-ringar av bentonit mot bergväggen. Alternativet med svällande betong utan O-ring värderas också. Dimensioner och materialkvaliteter analyseras med avseende på långtidsbeständighet och kemisk påverkan på omgivningen. Verifieringsförsök planeras som en del av buffertförsöken i Äspölaboratoriet.

Begränsning av det axiella flödet i den störda zonen

Slitsar in i bergväggen studeras vidare i fråga om form och placering. De teoretiska förutsättningarna provas genom modellering och beräkningar för olika bergförhållanden. Utformningar av fyllnadsmaterial i slitsen och stödjande pluggkonstruktioner för att hålla slitsmaterialet på plats analyseras. Möjligheter till utveckling av konstruktioner och verifiering av dessa kommer att ges i Äspölaboratoriet i samband med olika buffertförsök.

Tätning mot sprickzoner

Det är väsentligt att vattenföringen mellan sprickzoner och tunnlar i djupförvaret begränsas. För detta ändamål studeras effekter av olika pluggkonstruktioner med och utan injektering av sprickzonen och dess närberg. Betydelsefullt i detta sammanhang är långtidsbeständigheten av den tätande effekten.

Pluggar mot markytan

De översta ca 100 m av schakt och ramp mot dagen pluggas i syfte att försvåra mänskligt intrång. Betong används för att bygga en bergliknande tätning medan asfalt eller liknande material synes lämpligt för att täta mot vattentransport förbi pluggen. Olika konstruktioner analyseras med hänsyn till tätningsförmåga och beständighet.

Pluggning av borrhål

Befintlig teknik för pluggning av kortare (några hundra m) diamanborrhål i bra berg skall under sexårsperioden utvecklas för längre hål (1000 m). Dessutom behöver teknik tas fram för utfyllning av partier där hålet vidgats genom t.ex. bortspolning av lösare berg. Utvecklingen avser såväl materialval som hur pluggningen skall genomföras.

9.6.5 Övervakning

De tekniska möjligheterna till övervakning av ett delvis eller helt förslutet djupförvar kommer att utredas under den kommande sexårsperioden. Effekter av olika typer av övervakningsåtgärder på den kortsiktiga och långsiktiga säkerheten skall därvid beaktas.

9.7 ARBETEN AVSEENDE FÖRVARSDEL FÖR ANNAT AVFALL

De delar av djupförvaret som skall ta emot långlivat låg- och medelaktivt avfall (se avsnitt 8.1.1), kommer inte att tas i drift förrän omkring år 2020. Den teknik som behövs kan till stor del byggas på erfarenheterna från SFR. En uppdaterad inventering av detta avfall skall vara klar inför den säkerhetsanalys som kommer att vara en del i säkerhetsredovisningen inför ansökan om tillstånd för lokalisering av djupförvaret. Syftet med säkerhetsanalysen är att få underlag till hur förvaret skall utformas och till vilka fortsatta studier som behöver göras.

För att åstadkomma en god design och funktion behöver ett antal frågeställningar besvaras, varav de följande är några av de viktigaste:

- Vilka krav ställs på återfyllnadens buffertfunktion?
- Var behövs återfyllning och vad skall den bestå av? Behövs betongstrukturer och vad är i så fall kravet på livslängd?
- Vilka krav ställs på barriärerna vid anslutningarna till de olika förvarsdelarna?
- Hur skall avfallet hanteras vid deponering, dvs krav på fjärrmanövrering och strålskydd?

Arbete har startat med att bearbeta en del av frågorna ovan. Eftersom alla ovanstående frågor påverkar varandra, säkerhetsanalysen och designen kommer de att studeras som ett integrerat system. Pågående och planerade insatser för karaktärisering av avfallet redovisas i avsnitten 5.9 och 11.9.

9.8 DRIFTSÄKERHET OCH SAFEGUARD

Projekteringen av förvaret som helhet och särskilt vid utformningen av teknik för deponering kommer till stor del att styras av kravet på hög driftsäkerhet.

Kapslarna med det använda kärnbränslet anländer till djupförvaret i transportbehållare, vilka enligt referens-

konceptet transporteras ner under jord utan att öppnas, och fram till mynningen på deponeringstunneln. Där dockas transportbehållaren med det speciella deponeringsfordonet och kapseln förs över på deponeringsfordonet, som är utrustat med strålskyddande skärmar mot tunnelmynningen. Slutligen körs deponeringsfordonet fram till deponeringshålet och deponerar kapseln i det bentonitinklädda deponeringshålet, varefter detta fylls med bentonit upp till tunnelgolvet.

Övrigt långlivat avfall planeras bli hanterat på samma sätt som i bergsalarna i SFR, där transportbehållare körs in i deponeringsrummet. Transportbehållaren öppnas och kollina lyfts ur samt transporteras till sin deponeringsposition.

En analys av driftsäkerheten vid dessa hanteringsmoment ingår i arbetet med miljökonsekvensbeskrivningen och som underlag till tillståndsansökan, se också kapitel 10. Som underlag till detta genomförs en analys av den tekniska funktionen för hanteringssystemen i djupförvaret. Härigenom kan mer eller mindre sannolika tillbud och olyckshändelser identifieras. Det ger möjligheter till att genomföra driftsäkerhetsanalysen och att införa säkerhetshöjande åtgärder.

SKB kommer att inom de närmaste åren delta i IAEAs arbete med att ta fram en safeguardpolicy för djupförvaret (se kapitel 8). Vid projekteringen av djupförvaret och dess transporter kommer IAEAs rekommendationer att vara vägledande.

9.9 TRANSPORTER

Transporterna från inkapslingsanläggningen vid CLAB till djupförvaret utförs med uteslutande konventionell teknik. En säkerhetsredovisning tas fram som en del av miljökonsekvensbeskrivningen för djupförvaret. Valet mellan olika transportsätt och utrustningar blir en praktisk fråga kopplad till djupförvarets lokalisering. Någon egentlig forskning vad gäller transporter bedöms inte bli aktuell under de närmaste åren.

En utvecklingsinsats som blir aktuell är att modifiera referens-transportbehållaren, så att den anpassas till det senaste konceptet för kapslarna. En förnyad studie skall visa hur behållarens mekaniska egenskaper påverkas av den tyngre kapseln, och därmed hur behållarens utförande bör modifieras för att uppfylla de önskade säkerhetskraven.

Denna studie avses att genomföras under den kommande treårsperioden. Själva licensieringen av behållaren är dock en fråga som ligger betydligt längre fram i tiden.

10 PROGRAM FÖR SÄKERHETSANALYSER M M

10.1 ÖVERSIKT

I FUD-program 92 och kompletteringen till detta redovisades SKBs program för att lokalisera, projektera och bygga djupförvaret och inkapslingsanläggningen. Viktiga tillfällen för kommande beslut/tillstånd i detta program redovisas i kapitel 7 och 9 och sammanfattas i Tabell 10-1.

Inför de i Tabell 10-1 angivna besluten och tillståndsprövningarna kommer ett omfattande beslutsunderlag att redovisas. En viktig del av detta underlag rör den radiologiska säkerheten. Detta material redovisas i form av s k säkerhetsrapporter som samtidigt utgör en del av erforderlig miljökonsekvensbeskrivning.

Genom de många kärntekniska anläggningar som tagits i drift har rapporteringen av driftsäkerheten hos dessa standardiserats och likformats. Någon motsvarande standard för rapporteringen av den långsiktiga säkerheten efter förslutning av djupförvaret finns inte. Då emellertid den långsiktiga säkerheten kommer att redovisas vid ett flertal tillfällen vid utvecklingen av det svenska systemet för radioaktivt avfall har ett förslag till mall för säkerhetsrapporter presenterats i en separat rapport, SR 95 /10-1/. En sådan mall avser att förenkla

uppföljningen av hur säkerhetsanalyserna fortlöpande inkorporerar ett successivt mer detaljerat dataunderlag, och hur detta påverkar säkerhetsbedömningarna. SR 95 redovisar också de metoder och analysverktyg som idag finns tillgängliga för att genomföra analyserna av den långsiktiga säkerheten.

Nedan diskuteras omfattningen av de säkerhetsrapporter och övrigt säkerhetsanknutet material, som utgör underlag för de tre första beslutstillfällena. Därefter kommande beslut ligger så långt fram i tiden, att det inte är meningsfullt att idag redovisa kraven på erforderligt underlag.

10.2 ANSÖKAN OM TILLSTÅND FÖR INKAPSLINGSANLÄGGNINGEN

Inför start av byggande av en anläggning för inkapsling av använt kärnbränsle m m ansökes om tillstånd enligt NRL och KTL att lokalisera och bygga denna anläggning.

Tabell 10-1. Kommande säkerhetsanalyser.

Underlag för beslut om tillstånd för:		
Säkerhetsanalys	Inkapslingsanläggning	Djupförvar
Inkapslingsanläggning SR-I	Lokalisering Uppförande	
Djupförvar SR-D		Lokalisering Uppförande, inkl detaljerade geovetenskapliga undersökningar samt viss byggnation
Inledande drift (Steg 1)	Start inkapsling – använt bränsle Inledande drift – steg 1	Inledande drift – Steg 1 – deponering, successiv utbyggnad deponeringstunnlar
Reguljär drift (Steg 2)	Kompletterande utbyggnad Reguljär drift – steg 2	Reguljär drift – Steg 2 – deponering, successiv utbyggnad deponeringstunnlar
Avveckling	Avveckling	Ev övervakad lagring, förslutning

I beslutet efter kompletteringsrapporten till FUD-program 92 /10-2/ framhåller regeringen att

- SKB bör inte binda sig för någon specifik hante- rings- och förvaringsmetod innan en samlad och ingående analys av tillhörande säkerhets- och strål- skyddsfrågor redovisats,
- tekniska krav på enskilda barriärer och komponenter i slutförvarssystemet [bör inte] fastställas innan systemets totala säkerhet på ett tillfredsställande sätt redovisats,
- beslut (om uppförande av inkapslingsanläggning- en) bör inte fattas innan en säkerhetsanalys av slutförvarssystemet i sin helhet redovisats (...) och kun- nat visas lämplig,
- en samlad analys bör ingå som underlag i eventuella ansökningar (enligt NRL och KTL) för inkapslings- anläggningen.

För att utgöra den ovan begärda redovisningen av den samlade och ingående analysen av säkerhets- och strål- skyddsfrågorna skall underlaget för tillståndsansökan omfatta:

- Säkerhetsrapport för inkapslingsanläggningen.
- Redovisning av system för transport av inkapslat bränsle från inkapslingsanläggning till djupförvar.
- Säkerhetsrapport för djupförvaring av inkapslat an- vänt kärnbränsle efter förslutning.

Därutöver kommer underlag att tas fram för säkerhets- frågorna kring noll-alternativet enligt MKB-kraven och för en anläggning för torrlagring av eventuellt återtaget inkapslat kärnbränsle.

Säkerhetsrapporten för inkapslingsanläggningen omfattar den anläggning och den verksamhet som er- fordras för att inkapsla använt kärnbränsle m m. Den kommer att behandla inkapslingsprocessen för de använ- da bränsleelementen och övriga hårdkomponenter, samt nytillkommande verksamhet i CLAB som föranleds av inkapslingen. Rapporten kommer till sin uppläggning att likna de preliminära säkerhetsrapporter som samman- ställts inför byggande av kärnkraftanläggningar och CLAB.

Rapporten skall redovisa både säkerheten i och utanför anläggningen vid normaldrift och vid ev missöden, samt de arrangemang som vidtagits för att gällande strål- skyddsföreskrifter skall kunna efterlevas. Säkerhetsrap- porten skall vidare specifikt redovisa

- de krav som med hänsyn till strålskydd och säkerhet har ställts på kapseln, exempelvis på säkerhet mot kriticitet, på täthet och på mekanisk hållfasthet,
- den kvalitet i inkapsling som kan erhållas med den valda tillverkningsmekaniken,

- den prövning som skall utnyttjas för att visa att kraven har uppnåtts,
- hur eventuellt defekta kapslar kommer att hanteras.

Redovisning av transportsystemet omfattar det pla- nerade transportsystemet och omfattningen av erforder- liga transporter av inkapslat bränsle från inkapslingsan- läggningen till olika alternativa förläggningsplatser för djupförvaret. Redovisningen i detta skede är främst en genomgång av transportmöjligheterna.

De krav som gäller är i princip desamma som för det system som är i drift idag för transporter till CLAB och SFR. Nuvarande säkerhetsredovisning för dessa trans- porter täcker in det väsentligaste även för djupförvars- transporter.

Tyngden och hållfasthetskraven på koppar/stålkaps- larna föranleder specifika analyser av transportbehålla- ren.

Transportbehållarna kommer att licensieras enligt IAEA-reglerna för Typ-B-behållare, vilket innebär att specificerade krav beträffande strålskärning och håll- fasthet, både i normaldrift och under olyckor, uppfylls. I licensen för en sådan transportbehållare anges begräns- ningar för vad den får innehålla, m a o är kraven på behållarens utförande beroende på vad som skall trans- porteras i den. Sådan licensiering skall göras i god tid innan transporter beräknas börja, se vidare under transporter i avsnitten 10.3 och 10.4.

Transporten under jord redovisas i den säkerhetsrap- port som beskriver djupförvarets drift.

Rapporten om **djupförvarets långsiktiga säkerhet** omfattar djupförvaret för använt kärnbränsle och dess säkerhet efter förslutning.

Rapporten behandlar förståelsen av kapselns långsik- tiga säkerhetsfunktion (att isolera det använda bränslet från grundvatten och att fördröja ev spridning av radio- nuklider om isolationen förloras) under både förväntade och rimligt ogynnsamma förhållanden i förvaret. Den långsiktiga säkerheten för övriga avfallstyper som tas in i djupförvaret kommer att redovisas i samband med tillståndsansökningar för djupförvaret. Rapporten skall specifikt redovisa vilka miljöförhållanden som antagits föreligga när funktionskraven för kapseln fastställdes och jämföra dessa med de förhållanden som normalt förekommer i den berggrund som är aktuell för lokali- sering av djupförvaret.

Eftersom lokaliseringsprocessen inte förväntas ha hunnit till stadiet att data från kandidatplatser förelig- ger, kommer säkerhetsanalyserna att baseras på typiska förhållanden i svensk kristallin berggrund. Geokemiska förhållanden i det djupa grundvattnet kommer att väljas med hänsyn till den allmänna kunskapen om grundvatten i svenskt kristallint berg och med hänsyn till SKBs erfarenhet från tidigare undersökningsområden, Stripa och Äspö. De i kompletteringen till FUD-program 92 redovisade säkerhets- och byggnadstekniska lokalise-

ringsfaktorerna kommer att detaljeras, och säkerhetsbedömningens känslighet för variationer i dessa kommer att belysas.

När en kandidatplats har lokaliserats planeras en inledande undersökningsetapp utnyttjas till genomgång av platsens egenskaper med avseende på lokaliseringsfaktorerna, se kapitel 9. I denna avrapportering planeras också jämförelsen mellan antagna kemiska miljöförhållanden och verkliga förhållanden på aktuell plats att uppdateras.

Säkerhetsutvärderingen av noll-alternativet enligt MKB-krav innebär en analys av möjligheterna till – och säkerhetskONSEKVENSerna av – en förlängd drift i CLAB. Analysen baseras på säkerhetsrapporten för CLAB. Erfarenheterna av långtidslagring av zirkaloy-kapslat bränsle kommer att sammanställas liksom också en genomgång av erfarenheterna av torrlagring av bränsle.

Säkerhetsutvärdering av anläggning för torrlagring av ev återtaget inkapslat kärnbränsle skall presenteras för att visa på genomförbarheten av och säkerheten hos en långsiktig lagring av återtagna kapslar. Tillståndsansökan planeras dock inte omfatta torrlagret.

10.3 ANSÖKAN OM TILLSTÅND FÖR DJUPFÖRVARET

Ansökan inlämnas efter att ytbaserade undersökningar på två kandidatplatser har genomförts, men före det att byggande av en nedfart till aktuellt förvarsdjup påbörjas.

Ansökan avser tillstånd enligt NRL att få lokalisera djupförvaret och få genomföra detaljerade geovetenskapliga undersökningar för att bekräfta bergets lämplighet för förläggning av ett djupförvar för långlivat radioaktivt avfall. Eftersom vissa berganläggningar, som är nödvändiga för detaljundersökningarna, i ett senare skede kan komma att ingå som delar i ett djupförvar, konstaterade regeringen i beslutet efter kompletteringen till FUD-program 92 /10-2/, att detaljundersökningarna utgör ett led i uppförandet av en kärnteknisk anläggning. Därför kommer ansökan också att omfatta tillstånd enligt KTL att lokalisera och påbörja bygge av ett djupförvar på platsen.

Underlaget rörande säkerhetsfrågorna planeras därför omfatta:

- Säkerhetsrapport för transport av inkapslat använt kärnbränsle m m mellan inkapslingsanläggning och ett djupförvar placerat på den plats som föreslås för detaljundersökningar.
- Säkerhetsrapport för drift av djupförvaret på den plats som föreslås för detaljundersökningar inklusive ev återtagande av inkapslat bränsle.
- Jämförelse mellan de undersökta platserna m a p säkerhet och byggbarhet.

- Säkerhetsrapport för djupförvaring av långlivat avfall på den prioriterade platsen.

Säkerhetsrapporten för transportsystemet kommer att vara en vidareutveckling av den rapport som utgjorde underlag för tillstånd för inkapslingsanläggningen. Materialet kommer att detaljeras med hänsyn till aktuella transportvägar och med hänsyn till transporter av olika avfallstyper.

Innehållet kommer att omfatta redovisningar av organisation av transportverksamheten, transportbehållare, fartyg/fordon, rutter/vägval, omfattning av transporter, strålskydd under transport, olycksberedskap, fysiskt skydd, samt missödesanalys av de olika stegen.

Säkerhetsrapporten för driften av djupförvaret kommer att vara en preliminär säkerhetsrapport för den anläggning och verksamhet som erfordras för att deponera använt kärnbränsle och övrigt långlivat avfall, d v s för att

- ta emot transporter av inkapslat kärnbränsle och övrigt långlivat avfall,
- hantera och deponera aktuella avfallskollin på ett säkert sätt med hänsyn till strålskydd och säkerhet.
- återfylla deponeringstunnlar/deponeringsutrymmen till erforderlig kvalitet, samt
- återtaga tidigare deponerat inkapslat kärnbränsle om så skulle befinnas önskvärt.

Analyserna av djupförvarets långsiktiga säkerhet kan föranleda krav på metoderna för att bygga ut förvaret eller för att tillverka barriärkomponenter.

Rapporten skall redovisa både säkerheten i och utanför anläggningen vid normaldrift och vid en missöden, samt de arrangemang som vidtagits för att gällande strålskyddsföreskrifter skall kunna efterlevas. Säkerhetsrapporten skall specifikt redovisa

- de krav som med hänsyn till strålskydd och säkerhet har ställts på deponeringspositioner och deponeringsutrymmen,
- de krav som med hänsyn till strålskydd och säkerhet har ställts på tekniska säkerhetsbarriärer kring olika avfallskollin,
- den kvalitet som kan erhållas vid vald teknik för utbyggnad och tillverkning av närområdet och de tekniska barriärerna, inklusive den prövning som skall utnyttjas för att visa att kraven har uppnåtts resp hur ev defekta positioner och barriärer kommer att hanteras,

Jämförelsen mellan de undersökta platserna

Processen att undersöka och utvärdera kandidatplatsernas geologiska förhållanden och stegvis koncentrera undersökningarna till delar med god potential för byggbar-

het och säkerhet kommer att redovisas i programmet för platsundersökningarna (jfr kapitel 9).

De integrerade säkerhetsanalyserna föregås av analyser av områdets grundvattenrörelser, för att utnyttja förläggingsplatsen och placera de olika förvarsdelarna så att platsens säkerhetspotential utnyttjas effektivt. Den geologiska strukturmodellen, modelleringen av grundvattenrörelserna och identifiering av områden där djupt grundvatten når biosfären, kommer att göras till likvärdig nivå på båda kandidatplatserna, för att möjliggöra en jämförelse.

Platsspecifika förhållanden kan innebära att geometriska avgränsningar vid modellering av grundvatten eller nuklidtransport väljes olika på kandidatplatserna. En viktig del i jämförelsen är därvid kartläggningen av den säkerhetsmässiga betydelsen av osäkerheter eller alternativa tolkningar av kandidatplatsernas geologiska struktur, d v s att platsernas potential till att kunna ge en säker slutförvaring jämförs med hänsyn tagen till kvarstående osäkerheter.

Vid en tillräcklig och väsentligen likvärdig säkerhetspotential på båda platserna kommer jämte säkerhetsaspekterna även andra förläggingsfaktorer att vägas in.

Rapporten om djupförvarets långsiktiga säkerhet kommer att redovisa en platsspecifik analys av säkerheten hos ett djupförvar placerat på den kandidatplats som rekommenderas för detaljundersökningar. Kapseldata kommer att hämtas ur specifikationerna i den preliminära säkerhetsrapporten för inkapslingsanläggningen.

Inläggningen av de olika förvarsdelarna i förläggingsberget och layout för deponeringstunnlar etc kommer att göras plats specifikt och kopplas till undersökningar och utvärdering av kandidatplatserna (jämför kapitel 9). Den säkerhetsmässiga betydelsen av viktigare skillnader mellan de två undersökta kandidatplatserna kommer att belysas i variationsanalyser.

Säkerhetsanalysen kommer att omfatta både använt bränsle, steg 1 och steg 2, och övrigt långlivat avfall. Säkerhetsrapportens uppläggning kommer att följa samma mall som rapporten om djupförvarets långsiktiga säkerhet inför tillståndsansökan för inkapslingsanläggningen.

10.4 ANSÖKAN OM TILLSTÅND FÖR DRIFT – STEG 1

Tillståndsansökningar för drift inlämnas efter det att byggandet av inkapslingsanläggningen genomförts och prov visat att anläggningen är klar för att tas i drift och efter det att detaljerade geovetenskapliga undersökningar på förvarsplatsen bekräftat att platsen med goda marginaler ger tillräckliga utrymmen för ett förvar samt har sådana egenskaper att säkerhetskraven kan uppfyllas. Den planerade utbyggnaden enligt steg 1 innebär en ytterligare utökning av platsens dataunderlag. Efter det

att utbyggnadssteg 1 avklarats kommer de detaljerade undersökningarna att fortsätta inom området för steg 2.

Ansökningarna avser tillstånd enligt KTL för produktion av inkapslat bränsle och tillstånd för drifttagning av djupförvarets steg 1, d v s omfattande 5 – 10% av det använda kärnbränslet.

Säkerhetsunderlaget planeras omfatta:

- Säkerhetsrapport för drift av inkapslingsanläggning.
- Säkerhetsrapport för transporter av inkapslat kärnbränsle.
- Säkerhetsrapport för drift av djupförvarets steg 1.
- Säkerhetsrapport för djupförvaret efter förslutning, steg 1.

Säkerhetsrapport för drift av inkapslingsanläggning utgör en slutlig säkerhetsrapport för inkapslingsanläggningen.

Säkerhetsrapport för transporter av inkapslat kärnbränsle utgör en slutlig säkerhetsrapport för transportsystemet för inkapslat bränsle.

I detta skede licensieras transportbehållare för inkapslat bränsle enligt IAEA-reglerna för Typ-B – behållare. Transportbehållare för övriga avfallstyper licensieras i anslutning till ansökan för tillstånd till driftsteg 2.

Säkerhetsrapport för drift av djupförvarets steg 1 utgör en redovisning av säkerheten vid hantering av det inkapslade avfallet i djupförvaret.

Rapporten skall specifikt redovisa den successiva utbyggnadsmetodik som kommer att användas vid utbyggnaden av steg 1 inklusive

- grunderna för val av läge och acceptanskriterier för deponeringstunnlar, deponeringshål och tunnelpluggar,
- hur planerad tunneldragning och deponering anpassas vid det fall att bergpartier av undermålig kvalitet påträffas, samt
- planerad kvalitetskontroll.

Säkerhetsrapporten skall också slutligt beskriva metoder för applikation/tillverkning, acceptanskrav och kontrollmetoder för bentonitbuffert och återfyllnad.

Verksamhetens radiologiska konsekvenser skall redovisas under normala utbyggnads- och driftförhållanden och vid ev missöden. Även säkerheten vid återtagande av kapslar skall redovisas.

Säkerhetsrapport för djupförvaret efter förslutning, steg 1, utgör en redovisning av den långsiktiga säkerheten för djupförvaret för använt bränsle enligt samma principer som etablerats i tidigare analyser, d v s att avvägningar och beräkningar baseras på tillgängligt plats- och systemspecifikt underlag, och kompletteras

där så är nödvändigt med prognoser eller generisk information.

Analysen kommer att baseras på

- kapselegenskaper enligt slutliga säkerhetsrapporten för inkapslingsanläggningen,
- de acceptanskrav som definierats i säkerhetsrapporten för drift av djupförvaret vad gäller egenskaper hos berg och tekniska barriärer,
- en efter detaljundersökningarna reviderad biosfärsbeskrivning och strukturmodell av förvaret.

I och med att arbetsmetoderna i förvaret har definierats kommer ev konsekvenser av kvarblivet material i tunnarna att kunna detaljeras. Även förslutningen av deponeringstunnlar kommer att detaljeras, både vad gäller pluggningens utförande, placering och funktion. Med hänsyn till att funktionen av den första etappen av deponeringen kommer att följas upp samtidigt som detaljera-

de geovetenskapliga undersökningarna för steg 2 fortsätter, redovisas också hur den fortsatta verksamheten och funktionskontrollen påverkar förvarets säkerhet.

10.5 ÖVRIGA TILLSTÅNDS- ANSÖKNINGAR

Efter det att utbyggnaden och deponeringen av steg 1 genomförts kommer erfarenheterna att sammanställas för en totalutvärdering. Säkerhetsrapporterna kommer att revideras med avseende på faktiskt uppmätta förhållanden i förvarsberget och tekniska barriärer. Behovet att genomföra ändringar i metoder för byggande av barriärer eller bergutymmen och för kontroll av dessa kommer att utvärderas.

Resultaten kommer att utgöra underlag för ett ev beslut att söka tillstånd att fortsätta deponeringen i ett steg 2.

11 PROGRAM FÖR STÖDJANDE FoU

11.1 ALLMÄNT

Detta kapitel innehåller ett detaljerat program för den stödjande forskning och utveckling som behövs under sexårsperioden 1996-2001 för att genomföra FUD-programmets huvudinriktning. De olika avsnitten i detta kapitel förutsätter kännedom om motsvarande avsnitt i kapitel 5.

Den stödjande forskningen syftar till att:

- bygga upp en god förståelse för de fenomen och processer som kan ha betydelse för den långsiktiga säkerheten vid djupförvaring av radioaktivt avfall,
- vidareutveckla de numeriska modellerna för de processer i förvaret som är väsentliga för dess säkerhet,
- bygga upp erforderliga generiska databaser och jämförelsematerial så att förvarets funktion och säkerhet skall kunna utvärderas vid de planerade platsundersökningarna.

I FUD-program 92 bedömde SKB att en tillräcklig förståelse och förmåga till kvantifiering av djupförvarets säkerhet förelåg för att SKB skulle kunna påbörja lokalisering och byggande av de anläggningar som erfordras för djupförvaringen. Den utveckling som genomförts sedan dess har successivt fått en allt tydligare fokusering på teknik för praktisk platsundersökning, på uppbyggnad av barriärer, på granskning av andra avfallsformer än använt kärnbränsle, och på utvärdering av säkerhetens beroende av extremhändelser som istider, stora jordskalv, intrång etc. Dessa förhållanden återspeglas också i det fortsatta programmet.

Med hänsyn till den starka koppling som finns mellan inkapslingsprojektet och kapselanknutna FoU-arbeten redovisas dessa i kapitel 7. Motsvarande koppling förekommer också mellan FUD för tillverkning och kontroll av andra tekniska barriärer och djupförvarsprojektet. Programmet i dessa delar redovisas i kapitel 9.

Det till Äspölaboratoriet hörande FUD-programmet redovisas i kapitel 12. Under byggskedet har FUD-verksamheten där varit starkt kopplad till Äspölaboratoriets utbyggnad och karakterisering. Det fortsatta programmet kräver samplanering mellan de olika underjordsexperimenten. Kapitel 12 omfattar därför både tidigare påbörjad och delvis genomförd karakteriserings-, provnings- och experimentverksamhet i Äspö och de större integrerade demonstrationsförsök som kommer att genomföras.

Omfattningen av icke projektanknutna FoU-verksamheten fortsätter att minska men detta innebär inte att den kan avvecklas. Såväl demonstrationsförsök och praktis-

ka prov som platsspecifika berggrundsundersökningar kommer fortlöpande att identifiera frågeställningar och problem som kräver ytterligare fördjupning av kunskaper och databaser. Fördjupad förståelse bidrar också till att kunna beskriva förvarets troliga utveckling utan ogynnsamma förenklingar och till att bättre kunna kvantifiera säkerhetsmarginalerna.

Det är därutöver viktigt att vidmakthålla en hög kompetens inom områden väsentliga för säkerhet och genomförande.

11.2 ANVÄNT BRÄNSLE

Nu tillgängliga experimentella data från bränslelakning kan användas för att bestämma en övre gräns för utsläppet av radionuklider från använt bränsle i kontakt med grundvatten.

Målen för den kommande 6-årsperiod är:

- Fortsatt förbättring av förståelsen för hur radioaktiva ämnen frigörs från använt bränsle under olika förhållanden.
- Förbättring av nu tillgängliga modeller inför kommande säkerhetsbedömningar.
- Utveckling av en realistisk modell för frigörelsen av radionuklider från bränslet inför ansökan om detaljundersökningar och bygge av djupförvaret.

11.2.1 Fördjupad förståelse för hur radioaktiva ämnen frigörs från använt bränsle

Korrosion av använt kärnbränsle och frigörelse av fissionsprodukter och aktinider till grundvattnet beror av ett flertal faktorer som bränslets utbränning, grundvattnets sammansättning o s v. En bättre förståelse för korrosionsprocessen kräver en förbättrad kvantitativ bestämning av bränslets egenskaper och av yttre förhållanden som är av betydelse för korrosionsprocessen. Detta kräver fortsatt utveckling av mätmetoder och av analysmöjligheterna. Exempel på viktiga parametrar är ytan på bränslet, omfattningen av radiolytisk oxidation och redoxpotential. Flera av dessa parametrar måste mätas in-situ under pågående korrosionsexperiment. Det höga strålningsfältet kring bränslet försvårar dessa mätningar eftersom det inte kan uteslutas att mätsonder och elektroder påverkas av strålningen. Utvecklingsarbete kommer under den närmaste treårsperioden att läggas ned på att ta fram specifika experimentuppställningar för att

följa parameterförändringar, som redoxpotential och pH under bränslekorrosionsexperimenten.

Korrosion av högaktivt bränsle

Tyngdpunkten för korrosionsförsöken håller på att ändras från stora serier av lakningsexperiment av BWR- och PWR-bränsle i oxidativa miljöer till experiment under anaeroba och reducerande förhållanden. Miljön i lösningen kommer att styras med hjälp av en inertgasatmosfär eller reduktanter till exempel Fe(II) källor. Insatserna förväntas kräva mer komplicerade experimentuppsättningar i strålningsmiljö.

Undersökningar vid förhöjd temperatur under bränslekorrosionen för att påskynda bildandet av sekundärfaser pågår.

De relativt höga jonstyrkorna hos vissa djupa grundvatten innebär behov av mätningar av bränslekorrosion i grundvatten med måttlig salthalt. De experimentella resultaten kommer att användas för att så långt möjligt validera modellberäkningar baserade på förbättrade databaser för svaga komplex och lösligheter av fyrvärda aktinider.

Flödesexperiment

Flödesreaktorer har utnyttjats för studier av kinetiken vid upplösning av svårösliga ämnen. En planering för att utnyttja ovan nämnd teknik i SKBs bränslestudier pågår.

11.2.2 Förbättring av nu tillgängliga modeller

Lösligheten av aktinider och fissionsprodukter

Det är stor spridning på termodynamiska data för löslighetsbegränsande faser och species av U(IV), Np(IV) och Pu(IV). Så är speciellt fallet för lösligheten av $\text{PuO}_2(\text{s})$ under reducerande förhållanden och i närvaro av karbonat. Därför kommer experimentell bestämning av plutoniumdioxids löslighetsprodukt i karbonatlösningar vid reducerande förhållanden att genomföras.

Lösligheter och komplexbildningsjämvikter för fyrvärda aktinider är vanligen bestämda i höga jonstyrkor, för att komma förbi problemet med deras starka hydrolytiska och låga löslighet. Försök att förbättra mätmetoderna vid de jonstyrkor som förekommer i förvarsmiljö, kommer att genomföras under perioden.

Modellutveckling

Utvecklingen av modeller kommer att styras mot att integrera mekanismerna och takten för bildandet av radiolytiska oxidanter med effekter av oxiderande skikt

och gradienter. Utvecklingen av de grundläggande kinetiska teorierna gör det möjligt att integrera denna grundläggande information med modellerna för använt bränsle.

Data rörande takten och mängden av producerade oxiderande radiolytiska species kommer, tillsammans med information om hur de växelverkar med bränsleytan, att utnyttjas för att utveckla en kvantitativ kinetisk modell för bränslets upplösning. Dessutom planeras försök för att förstå och kvantifiera kinetiken för utfällning av sekundära faser i förvarsmiljö, d v s bestämning av den kritiska U(VI) koncentrationen och yta/volym förhållandet som initierar utfällning, samt av dessa parametrars inverkan på ytan hos det använda bränslet.

Naturliga analogier

Korrosion av använt kärnbränsle under långa tider kan bara förutsägas genom att kombinera data från relativt korta laboratorieexperiment med studier av naturliga analoger. Arbetet under perioden kommer att fokuseras på en bättre förståelse för strukturen och kristallkemin hos uranoxiderna och av omvandlingssekvensen hos uranyl-föreningar. Det innefattar arbete med att ta fram mer pålitliga termodynamiska data för några av de möjliga sekundära faserna, för att använda dessa i en modell för bränslekorrosion under långa tider.

11.2.3 Realistisk modell för frigörelsen från bränslet

Radiolys

Som nämnts tidigare kan radiolys vara en mycket viktig process för bränsleupplösning, eftersom den kan störa de ostörda reducerande förhållandena i djupa grundvatten. Experiment med sikte på att bestämma mängden av oxidanter producerade genom radiolys pågår och kommer att fortsätta. Data från dessa experiment kommer att användas i en mer detaljerad modell för radiolytisk oxidation/upplösning av urandioxidmatrisen.

Karaktärisering av använt kärnbränsle

Experiment för att bestämma mängden av oxidanter producerade genom radiolys har visat att syre tycks förbrukas i systemet utan att en motsvarande oxidation av urandioxid till U(VI) kan påvisas. Försök kommer att göras att fastställa hur detta syre förbrukas av bränslematrisen. Detta innebär bestämning av förhållandet syre/metall i bränslet före och efter lakning och undersökning av bränslet med röntgendiffraktion och elektronmikroskopi. Omfattande utveckling av metoder kommer att krävas och arbetet förutses pågå under hela sexårsperioden.

11.3 BUFFERT OCH ÅTERFYLLNING

Funktionskrav på buffert och återfyllning liksom kunskapsläget och kvarstående FUD-frågor redovisas i avsnitt 5.4.

Mål

Arbetet skall resultera i det underlag som behövs för säkerhetsanalyser inför kommande tillståndsansökningar, för prediktion och planering av fältförsök i Äspölaboratoriet samt för den projektering av Djupförvaret som startar när platsdata från kandidatplatser blir tillgängliga. Viktiga delmål under perioden är:

- avsluta pågående sammanställning av kunskaper och erfarenheter från tidigare buffertforskning,
- ta fram en förbättrad materialmodell för simulering av vattenmättnadsförlopp i bufferten,
- förbättra kunskapen om och modelleringen av (vät)gastransport genom bufferten, särskilt vid upprepade cykler av gasutsläpp.

Program

Arbetet inriktas på en fortsatt uppbyggnad och fördjupning av kunskap i frågor som är väsentliga för buffertens funktion på lång sikt samt på verifiering av de nuvarande kunskaperna i storskaliga fältförsök. Fördjupad kunskap byggs också upp om vattenmättnadsförloppet. Förberedelser för projektering av Djupförvaret fortsätter genom framtagning och sammanställning av kunskaper för analyser och optimering av dimensioner för bufferten samt för val av bentonitinhåll och ballast i återfyllnadsmaterialet.

Olika bentonitmaterials egenskaper

Arbetet med sammanställning av kunskaper och erfarenheter från buffertforskningen fortsätter. Del I är färdig och behandlar grundläggande definitioner och metodbeskrivningar. Del II ger *materialbeskrivningar* med genomgång av praktiskt betydelsefulla data för buffertar och återfyllningsmaterial samt redogörelse för metoder för framställning av sådana material i bulk- och blockform. Metoder för kvalitetssäkring redovisas. Del III blir en sammanställning av *matematiska modeller* för att prediktera transportprocesser av olika slag och för att analysera reologiska fenomen, t ex krypning.

Den *mikrostrukturella modellen* för bentonit vidareutvecklas genom mikroskopiska undersökningar. Modellen kommer att tillämpas på återfyllningsmaterialet för att beskriva bentonitfasens homogenitet i porerna i ballastmaterialet. Modellen utvecklas vidare för att kunna simulera svällning, kompression, krypning, genomströmning av gas, transport av vatten och diffusion.

Kunskaperna om buffert och återfyllnadsmaterial skall successivt användas i *projekteringen av djupförvaret* för att fastställa dimensioner, metoder och kvalitet. För att

få underlag till optimering fördjupas vissa kunskaper om buffertens långtidsfunktion. Plan för att långsiktigt säkra önskad bentonitkvalitet utarbetas under perioden.

Viktigt för optimeringen är *beständigheten* hos montmorillonit, som utgör huvudmineralet i bufferten och därför bestämmer dess egenskaper. En kinetisk modell för omvandling av montmorillonit till illit föreligger. Det fortsatta arbetet inriktas på att öka noggrannheten i beräkningar av omvandlingshastighet och att beskriva och värdera alternativa omvandlingsprocesser och deras betydelse med hänsyn till bentonitens ursprungliga kvalitet. Syftet är att i detalj kunna specificera kravet på bentonitkvalitet för olika förvaringsmiljöer.

Undersökningar av *kemiskt betingade förändringar* hos smektitrika leror bedrivs genom laboratorie- och fältförsök parallellt med studier av naturliga analogier. Fältförsök genomförs i Äspölaboratoriet.

Studierna av *naturliga analogier* fortsätter. Framst granskas omvandlingsprocesser vid höga pH, temperaturens betydelse och cementering. Delar av arbetet genomförs, liksom tidigare, i samarbete med olika internationella institutioner.

Beräkningsmodeller

Materialmodellen och ABAQUS-koden, som beskriver buffertens egenskaper och olika termo-hydro-mekaniska (THM) processer i vattenmättat tillstånd, behöver kompletteras. Det gäller framför allt volymkrypning och plastiska, volumetriska töjningar. Dessa egenskaper undersöks i långtidsförsök i laboratoriet. ABAQUS-koden uppdateras på dessa områden.

Under en period efter deponeringen kommer buffertmaterialet att vara omättat till dess vatten från berget tagits upp och helt fyllt ut alla porer i bufferten. Den preliminära materialmodellen för simulering av THM-processer och *vattenmättnadsförlopp i omättad buffert* kompletteras och förbättras för att möjliggöra utvärdering och prediktion av processerna i de fullskaliga buffertförsöken i Äspölaboratoriet. Laboratieförsök på omättade bentonitprover planeras. Resultaten av dessa i kombination med teoretiska studier används till en förbättrad modell som bl a tillämpas på verifieringsförsök i både laboratorie- och fältmiljö.

Genom deltagande i det internationella samarbetsprojektet VALUCLAY (SKB, AECL och PNC), som syftar till att jämföra och utbyta information om THM-processer i omättade lerbuffertar, erhålls värdefull granskning och utvärdering av olika modeller.

Gastransport

Processen för transport genom bentonitbufferten av den vätgas som kan bildas i händelse av hål på kopparrmanteln och vatteninträngning i kapseln har beskrivits och en konceptuell modell för förloppet har ställts upp. För att bättre kvantifiera transportkapaciteten och verifiera förloppet under lång tid planeras laboratorieexperiment med låga gasflöden och upprepade cykler av genombrott

och självläkning av bentoniten. Resultaten utnyttjas till en förbättrad modellering av transportkapaciteten hos olika buffertkvaliteter.

Kemifrågor etc för buffert och återfyllnad

Ett program för mätningar av *diffusion* i bentonit pågår inom kemiprogrammet, och experiment med *bakterier* i bentonitbuffert kommer att genomföras, se avsnitt 11.5.

Undersökningarna av *betong och cement* bedrivs med målsättningen dels att beskriva betongens egen stabilitet och utveckling med tiden, dels att förutse betongens eventuella inverkan på förvaret och de material som ingår där. Analyser av gammal betong kommer att genomföras och kemiska experiment med betong övervägs. Ytterligare experiment med påverkan av betong på omgivande berg planeras.

11.4 BERGGRUNDEN

I avsnitt 5.5 ges en sammanfattande beskrivning av kunskapsläget om berggrundens barriärfunktion vid ett djupförvar. Mot bakgrund av kunskapsläget planeras följande program för perioden 1996-2001. Programmet omfattar endast berggrundsrelaterade frågeställningar inom SKBs stödjande FoU-verksamhet. Program för Äspölaboratoriet redovisas separat i kapitel 12 och många geokemiinriktade frågor behandlas i avsnitten 11.5 samt 11.8. Utveckling av undersökningsmetoder och instrument framgår i avsnitt 9.4.2.

11.4.1 Strukturgeologi och mekanisk stabilitet

Platsspecifika bergmekaniska frågor vid en djupförvarsanläggning behandlas främst inom Äspö-laboratoriet. Inom den stödjande FoU-verksamhet ingår mer grundläggande hållfasthetstekniska aktiviteter samt tektoniska bedömningar.

Mål

Verksamheten skall kvantifiera och utreda konsekvenserna av långsiktig tektonisk påverkan inklusive jordskalv och glaciationscykler. Viktiga delmål under perioden är därvid att:

- sammanställa de vertikala lastsituationer som varit rådande, och de konsekvenser dessa laster haft på det svenska urberget i geologiskt tidsperspektiv,
- sammanställa och statistiskt bearbeta data över förskjutningsbelopp från diskontinuiteter (sprickor/zoner) i det svenska urberget,
- sammanställa kunskaperna om vad seismiska effekter betyder för ett djupförvar.

Program

Geologiska och berggrundsstrukturella förutsättningar

Kartläggning av tidigare sedimentlagars utbredning och mäktighet på det subkambriska peneplanet med hjälp av fissionsspårdatering. – Studien skall ge ett underlag för att diskutera tidigare vertikala lastsituationer och deras konsekvenser på Baltiska skölden under Fanerozoikum i relation till förekommande islaster under Kvartärperioden.

Vidareutveckla metoder för identifiering av *subhorizontella strukturer i berggrunden* – huvudsakligen genom att förbättra tolkningar av reflektionsseismiska undersökningsmetoder.

Urbergets mekaniska egenskaper

Öka förståelsen av *bergspänningsmätningars representativitet* genom sammanställning av tillgängliga mätdata.

Genomföra och tolka *bergspänningsmätningar på djup* ned till 1500 m i borrhålet KLX 02, Laxemar, Oskarshamns kommun.

Bestämma *normalstyvhet i fält för sprickor*. – Fältarbetet genomförs med en något modifierad utrustning för bergspänningsmätningar med hydraulisk spräckning. Metoden testas i Laxemar djuphål.

Medverka till *bergmekanisk teoriutveckling* när det gäller *kryprörelser* av tunnelväggar och bedömningar av *effektivspänningar* i sprickigt berg.

Geodynamiska och mekaniska processer

Öka förståelsen om den kristallina berggrundens uppsprickning i tektoniskt, historiskt perspektiv, bl a genom fältstudier som kartlägger maximala iakttagbara förskjutningsbelopp för diskontinuiteter (sprickor/sprickzoner) i olika skalor.

Utreda förutsättningarna för *hydraulisk uppspräckning* och/eller propagering av redan existerande sprickor/sprickzoner i samband med en *glaciationscykel*. – Den av SKB utvecklade glaciationsmodellen erbjuder möjligheter att bedöma dessa effekter.

Studera *aseismiska rörelser* och pågående *landhöjning* bl a med hjälp av de nyligen installerade permanenta stationerna i det svenska GPS-nätet. – Den strandförskjutning som iakttas är avhängig landhöjning (isostasi) och eustatisk havsytehöjning.

Öka förståelsen om orsakerna till de *jordskalv* som förekommer i Baltiska skölden.

Sammanställa erfarenheter av förekommande jordskalv vid *forskningsgruvan Kamaishi*, Japan och generalisera eventuella effekter på en underjordsanläggning. – Arbetet sker inom ramen för ett bilateralt avtal mellan SKB och PNC, Japan.

Vidareutveckla *dateringsmetoder av tidigare sprickzonsrörelser*.

Vidareutveckla kvantitativa kriterier för klassificering av diskontinuiteter i berggrunden. – Kriterierna skall tillämpas för att bedöma respektavstånd till förvarsdelar och kapselpositioner. Arbetet skall ses som en fortsättning av den metod som utarbetades i Stripaprojektet.

Utreda den eventuella effekten av ett djupförvar på bergets hållfasthet i ett regionalt perspektiv. – Frågeställningen gäller om djupförvaret skall ses som ett horisontellt svaghetsplan i samverkan med eller fristående från regionala sprickzoner. Projektet har nära koppling till ovanstående klassificeringsprojekt.

11.4.2 Grundvattenkemi

Platsspecifika grundvattenkemiska frågeställningar vid ett djupförvar hanteras främst inom Äspöprojektet. I SKBs stödjande FoU-verksamhet ingår grundläggande kunskapsuppbyggnad om kemiska processer.

Mål

Insatserna syftar till att ytterligare klarlägga de hydrokemiska processer som kan påverka djupförvarets olika barriärfunktioner. Viktiga delmål under perioden är därvid att:

- sammanställa slutligt program för hydrokemi vid platsundersökningarna
- avrapportera hur K_d konceptet kan användas och vilken tillförlitlighet konceptet har vid beräkningar av nuklidtransport.

Program

Vidareutveckla matematiska/statistiska metoder för att kunna beskriva och förutsäga de hydrokemiska förhållandena regionalt, lokalt och i förvaret under olika faser av en platsutvärdering. – Matematiska/statistiska metoder används för att klassificera vattenkemiska data i databasen. I dagsläget predikteras förhållanden på platser som tidigare undersökts för att sedan jämföras med uppmätta resultat. En strävan är att även söka utnyttja tillgängliga hydrologiska data.

Fastlägga tekniskt innehåll samt logistik för hydrokemiska undersökningar och utredningar i kommande platsundersökningsprogram. – Hydrokemiska, geologiska och geohydrologiska undersökningar och utvärderingar utgör tillsammans kärnan i en platskaraktisering. Ett integrerat program som sammanlänkar dessa insatser beskrivs i 9.4. Innehållet i det hydrokemiska delprogrammet måste optimeras med hänsyn till uppställda del- och etappmål men även till logistiken i hela platskaraktiseringsprogrammet. En viktig del av arbetet är att planlägga det praktiska genomförandet och att bedöma resurs- och tidsbehov för de olika insatserna.

Modellera och visualisera hydrologi-kemi-isotopdata på ett överskådligt sätt. – Kopplad modellering av hyd-

ro-kemi-isotopdata görs inom ramen för det internationella samarbetet på geokemiområdet på Äspö. En målmedveten systematisering och standardisering av dessa arbeten kräver modellverktyg och presentationer som kan utnyttjas av flera olika användare. Rock Visualization system, se avsnitt 12.4.3 är en utmärkt bas för vidare bearbetning och modellering. Verktuget skall utnyttjas dels i kommande internationella samarbeten på Äspö, se kapitel 12, och dels i framtida platskaraktiseringar.

Undersöka och beskriva hydrokemiska förhållanden i lågkonduktivt berg och vidareutveckla provtagnings- och analysteknik – Hydrokemin i lågkonduktivt berg är snarlik den i de konduktiva partierna, se 5.5.5. Detta är fortfarande en preliminär slutsats som kräver mer arbete dels på provtagnings och analysidan, men även på modellsidan. Arbeta avser att besvara frågor om jämviktsmodellens värde vid beskrivning av grundvatten-berg systemets kemi.

Beskriva de hydrokemiska förhållandena regionalt kring Äspö under den senaste glaciationen. – Regionala och paleohydrogeologiska utredningar planeras ingå i det paleohydrogeologiska programmet och i det internationella Äspösamarbetet, se avsnitt 5.5.8 och kap. 12. Likheter och olikheter i vattenkemi hos de undersökta platserna kommer att analyseras.

Avsluta utvecklingen av "in situ K_d konceptet" – In situ K_d konceptet innebär att de naturligt förekommande grundämnen som är analoger till radionukliderna i det använda bränslet analyseras i vatten och i sprickmineral. Analysresultaten används till att tolka dessa ämnens transportbenägenhet och beräkning av ett in situ K_d värde. Detta värde jämförs med resultat av laboratoriemätningar. Arbetet har pågått under flera års tid och kopplas till hur sprickor klassificeras och karakteriseras, se avsnitt 12.5.2. Resultaten utvärderas i syfte att belägga användningen av K_d konceptet vid nuklidtransportberäkningar.

11.4.3 Bergets förmåga att begränsa radionuklidtransport

I detta avsnitt behandlas huvudsakligen regionala flödes- och transportvillkor. Vidare behandlas fysikaliska och vissa kemiska processer som kopplas till det grundvatten-hydrauliska systemet. För nuklidtransport hänvisas generellt till avsnitt 11.5 och avsnitt 11.8. Platsspecifika insatser på geohydrologi och grundvattentransport av lösta ämnen sker huvudsakligen vid Äspölaboratoriet och i Laxemarprojektet (se kapitel 12 och 5.5.7). Hydrogeologiska undersökningsmetoder behandlas främst i kapitel 9.

Mål

Insatserna syftar till att öka förståelsen av hur grundvattenflödena är fördelade i berggrunden samt hur lösta ämnen transporteras, fördröjs och fastläggs. Viktiga delmål under perioden är därvid att:

- fastställa hur hydrauliska tester skall utföras och tolkas vid kommande platsundersökningar,
- sammanställa metoder för karakterisering och mätning av fältparametrar för nuklidtransport och retardation i sprickigt berg.

Program

Grundvattenflöde och advektion

Vidareutveckla in situ-metoder för bestämning och analys av hydrauliska egenskaper i sprickigt berg. – Metoderna skall beakta såväl stationära som transienta enhåls- och mellanhålsterter.

Sammanställa tillgängliga databaser om kinematisk porositet och dispersion i sprickigt berg

Vidareutveckla metoder för bestämning av absoluttryck och hydrauliska gradienter i berg samt deras variation mot djupet under markytan. – Detta är en viktig information för att bedöma ett djupförvar i förhållande till grundvattenflödets in- och utströmningsområde.

Vidareutveckla metoder för att bedöma ev temperaturinducerade konvektionsflöden i relation till de naturliga grundvattenflödena och då med hänsyn till grundvattnets salthalt.

Bearbeta *brunnsdata* från Protoginzonen, Mylonitzonen och någon annan tolkad storregional diskontinuitet samt ställa dessa data i relation till omgivande berggrunds brunnar. Projektet skall belysa om signifikanta skillnader finns mellan de hydrauliska egenskaperna i olika områden.

Utreda *blandningsprocesser mellan salt och sött grundvatten* i berg med hänsyn till landhöjning och Östersjöns utvecklingsstadier – Studien syftar till att förbättra kunskapen om grundvattenomsättning i områden under tidigare högsta kustlinje. Projektet har koppling till SKBs paleohydrogeologiska program.

Retardation

Utveckla borrhålsbaserade in situ-metoder för att bestämma *parametrar för transport av lösta ämnen* – I säkerhetsanalyser erfordras transportparametrar som K_d , våt yta och kinematisk porositet. Spårämnesförsök i fält, som kan ge dessa parametrar för en bergvolym i blockskala, är relativt omfattande. Det krävs exempelvis ett flertal borrhål. Det är önskvärt att utveckla tester som kan genomföras som enhålstester. En tänkt utgångspunkt kan vara kombinerade spårämnesförsök och hydrauliska tester med injektion av spårämne följt av en pumpningsfas. Idén bör testas med modellsimuleringar och projektet skall ses som ett komplement till de spårämnesförsök, TRUE, som skall genomföras vid Äspölaboratoriet.

Bevaka kunskapsläge om *geogastransport*. – Förutom den migrationsinriktade aspekten bör bevakningen även beakta möjligheterna att nyttja information om geogas som ett indirekt tecken på sprickor/sprickzoner med viss konduktivitet.

Karakterisering av sprickor m h t nuklidtransport och retardation

Vidareutveckla *metoder för beskrivning* av sprickors geometri och deras hydrauliska och retarderande egenskaper.

Utreda *hydrauliska egenskapers storskaliga beroende av bergspänningar*. – I Äspö och Laxemarområdet finns sannolikt tillräckliga databaser för att korrelera hydraulisk information mot bergspänningsmätningar.

11.4.4 Modellverktyg och modellutveckling

Beräkningsmodeller utvecklas främst inom ramen för SKBs arbete med säkerhetsanalyser och vid Äspölaboratoriet. Kompletterande insatser redovisas nedan.

Mål

Syftet med nedan angivna program är att stödja vidareutvecklingen av modellverktygen och stärka möjligheterna till granskning av deras tillämpbarhet. Viktiga delmål under perioden är därvid att:

- sammanställa erfarenheter och resultat från det paleohydrologiska programmet,
- sammanställa hur termo-hydro-mekaniska kopplade modeller kan utnyttjas för att beskriva processer i djupförvarets närområde,
- ta fram underlag för val av modeller för grundvattenströmning och nuklidtransport med hänsyn till olika skalor.

Program

Vidareutveckla metoder för att beakta effekter av *beräkningsskalor i grundvattenmodeller*. – Generaliserande grundvattenmodeller baseras på indata som representerar vissa mätvolymer. Ett område kan samtidigt modelleras med data representerande olika informationstäthet och upplösning. Eventuella effekter av detta på modelleringsresultaten skall granskas.

Vidareutveckla olika modellkoncept för *transport av radioaktiva ämnen* för att hantera berggrundens advektiva flöde och retarderande processer.

Utveckla *bergmekanisk modellering* där större hänsyn tas till skalberoende och statistisk fördelning av ingående parametrar. – Inom den bergmekaniska modellerings-tekniken nyttjas främst ett deterministiskt synsätt med relativt få indata från direkta fältmätningar. Konsekvenserna av ändrade förutsättningar i ett bergmekaniskt beräkningsproblem belyses oftast med sensitivitetstester. Om relativt omfattande fältmätningar genomförs på en plats finns förutsättningar för statistiska analyser av data och stokastisk modellering

Vidareutveckla *termo-hydro-mekaniskt kopplade modeller*. – SKB fortsätter att engagera sig i validering och verifiering av termo-hydro-mekaniska modeller, t ex

inom ramen för det internationella programmet, DECOVALEX II.

Genomföra SKBs *paleohydrogeologiska program*. – Glaciationsmodellen vidareutvecklas och ett utförligare underlag tas fram när det gäller klimatdata med nederbördsuppgifter från interglaciationsperioder. Regional modellering exemplifieras för Äspö-Laxemarområdet.

Vidareutveckla metoder för *indatahantering till stokastiska modeller*.

Vidareutveckla klassificeringsmetoder för att *sammanväga de geovetenskapliga faktorer* som ingår i lokaliseringprocessen – Verksamheten skall ses som en fortsättning på de projekt som genomförts med inriktning på hydrogeologisk beslutsteori.

11.5 KEMI

Mål

Målet för de kemiska undersökningarna är att förbättra dataunderlag och förståelse för väsentliga processer i ett djupförvar genom att

- mäta och uppdatera sammanställningarna av kemiska basdata för löslighet och komplexbildning av radioaktiva ämnen i och utanför förvaret,
- bestämma halter, stabilitet och rörlighet av radioaktiva ämnen i form av kolloider organiska komplex och mikrober,
- bestämma radioaktiva ämnens retention i berg och återfyllnadsmaterial på grund av sorption och diffusion,
- utvärdera och sammanställa betydelsen av den kemiska inverkan från bl a mikrobiella processer och cement i ett förvar.

Experimenten genomförs också med målsättningen att pröva (validera) de modeller som används för att beskriva kvarhållning, frigörelse och spridning av radioaktiva ämnen från ett slutförvar.

Program

Löslighet, komplexbildning och kinetik

Granskningen och kompletteringen av databasen fortsätter. I nuvarande insatser prioriteras plutoniumförsöken. Förförsök har genomförts och ytterligare experiment förbereds. Andra ämnen kan bli aktuella i den mån säkerhetsanalyser pekar ut osäkerheter i databaserna.

Organiska komplex, kolloider och mikrober

Området *kolloider* i djupa grundvatten bevakas även i fortsättningen och halterna följs upp med provtagningar och analyser. Betydelsen av att kolloider genereras i närområdet och möjligheten till samverkan mellan gasbubblor och partiklar kommer att utredas ytterligare.

Även området *humus- och fulvosyror* i djupa grundvatten bevakas fortsättningsvis och naturliga halter kartläggs med provtagningar och analyser. Det återstår att identifiera vad de övriga organiska ämnena lösta i grundvattnet består av. Vidare planeras studier av de organiska ämnen som kan komma från material i förvaret.

Arbetet med *mikrober* kommer även i fortsättningen att omfatta provtagning och analys av djupa grundvatten, samt laboratorieförsök och försök med mikrober i förvarsmiljöer, t ex i buffert och återfyllnad.

Sorption och diffusion

Det finns bra och användbara sammanställningar av parametrar som beskriver sorption och matrisdiffusion av radionuklider i berg. I och med att teknik för provtagning och mätning utvecklas kan det emellertid finnas skäl att göra om eller komplettera tidigare mätningar. Behovet utreds, men tills vidare används befintliga data.

Prövningen av avancerade modeller för *ytsorption* fortsätter. Målet är inte primärt att ersätta användningen av sorptionskoefficienter (K_d -värden) utan att öka förståelsen av mekanismerna för sorption på mineralytor.

Modeller och parametrar som används för att beräkna *diffusion av radionuklider i bentonitbufferten* baserar sig i hög grad på sk profilmätningar. I många fall är det helt tillräckligt, men inte för relativt lättrorliga joner som Cs^+ , Sr^{2+} och I^- . Data för dessa joner kompletteras därför med mätningar av genomdiffusion och sorption i kompakterad bentonit för att om möjligt få underlag till noggrannare beräkningar och bättre modeller för diffusion under stationära förhållanden. Experimenten kommer att utvärderas under 1997.

Valideringsexperiment

Experiment görs i laboratorium för att pröva (validera) de modeller och antaganden som används i säkerhetsanalysen för att beräkna spridning av radionuklider i närområdet och berget. En del av detta arbete syftar även till att förbereda senare in-situförsök i Äspölaboratoriet.

Försök görs även för att validera geokemiska modeller. Vattenlösningar, med en sammansättning som efterliknar betongporvatten, leds genom kolonner med krossade mineral. Syftet är att pröva (validera) geokemiska beräkningsmodeller som beskriver hur berget påverkas av betong under mycket lång tid. Försöken sträcker sig t o m 1997.

11.6 BIOSFÄREN

Mål

Målet för SKBs studier av radioaktiva ämnens uppträdande i biosfären är att kunna genomföra trovärdiga konsekvensberäkningar i säkerhetsanalyserna.

Delmål i denna process är:

- att kvantifiera de osäkerheter som beror på att biosfären hela tiden förändras,
- att sammanställa platsspecifika utvärderingar av kandidatplatsernas potential och begränsningar för förändringar i biosfären,
- att förbättra det dataunderlag som spridningsmodellerna vilar på,
- att validera modellerna genom studier av analoga spridningsprocesser.

Program

Biosfärens evolution

Den största osäkerheten i biosfären hänger ihop med ekosystemens naturliga evolution under de tidsperioder som djupförvaret förväntas ha en säkerhetsfunktion. Exempel på processer som blir viktiga redan i ett 1000-års-perspektiv är

- igenväxning av sjöar och uppodling av de gamla sedimenten (även på landhöjning),
- erosion av jordar med vind och vatten,
- omlagring av sediment i sjöar och vattendrag.

Människan utnyttjar de ekologiska systemen bl a för sitt näringsfång och förändrar dessa för att öka utbytet av grödor m m. Detta kan också sägas utgöra en slags evolution. Sådan påverkan kan ha stor betydelse för konsekvensen av radioaktiva ämnen som eventuellt når biosfären, speciellt om sådana företeelser som stadsbyggnation, storskalig jordfri odling, dammbyggnader eller växthuseffekten tas med i bilden.

I samband med att lokaliseringsprocessen fortskrider kommer de fortsatta insatserna att bli platsspecifika och inriktas på att söka identifiera sådana förhållanden som kan begränsa spännvidden i utvecklingsmöjligheterna på de platser som utväljs för platsundersökningar. Exempel på sådana förhållanden är klimat, jordarter och topografi som sätter naturliga gränser för människans utnyttjande av naturen.

Transport till människor genom produktion och distribution av livsmedel

Produktionsmetoderna för livsmedel är en av de faktorer som påverkar hur olika delar av ekosystemen knyts till människans inre miljö. Ett exempel från dagens situation är bevattning av åkermark vars omfattning måste förändras inom några hundra år, beroende på ackumulering av salter m m i jordarna.

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.

För att lokalt kartlägga dessa transportvägar kommer platsspecifika studier av kandidatplatser att göras inom ramen för platskaraktiseringsprogrammet. Studierna anpassas till varje plats men kommer att omfatta före-

komst av naturlig radioaktivitet i ytliga vatten, grundvattenförhållanden, utströmningsområden, jordarter, markanvändning, biota, befolkning m m.

Acceptanskriterier

Val av radiologiska acceptanskriterier har stor betydelse för hur biosfärsanalyser skall göras. De svenska myndigheterna förväntas under 1995/1996 att ge ut föreskrifter. Detta arbete och arbetet inom internationella grupper som IAEA och ICRP kommer att bevakas.

11.7 SÄKERHETSANALYSMETODER

Säkerhetsanalysernas genomförande kräver dels systematiska metoder, för t ex granskning av möjliga scenarier eller osäkerheter, dels modeller för att kvantifiera de väsentliga processerna i förvaret. Ett antal metoder och modeller har utvecklats och tillämpats, för att genomföra analyser av långsiktig säkerhet vid djupförvaring av radioaktivt avfall. Dessa diskuteras i kapitel 5. Tillämpning av dessa metoder på en specifik förvarsutformning och plats exemplifieras i SR 95 /4-11/.

Standardiserade metoder underlättar genomförandet av säkerhetsanalyserna och av granskningen. Eftersom dock både informationsunderlaget och syftet med säkerhetsanalyser kan vara mycket olika förväntas både metoder och modeller ständigt behöva anpassas eller vidareutvecklas.

Planerade FUD-insatser för säkerhetsanalyserna syftar till

- att granska och vidareutveckla förståelse för viktigare processer i djupförvaret och dess närhet, och hur dessa skall modelleras i funktions- och säkerhetsanalyserna,
- att vidareutveckla säkerhetsanalysens numeriska modeller för kvantifiering av djupförvarets funktion efter dess förslutning,
- att inför varje redovisningstillfälle anpassa metodik och modeller för analyserna till den specifika säkerhetsanalys som skall genomföras.

Stödjande FUD-insatser enligt den första punkten har redovisats i avsnitten om bränsle, buffert, geovetenskap, kemi och biosfär ovan.

Programmet för övriga stödjande FUD-insatser under den kommande sex-årsperioden diskuteras nedan under rubrikerna metodutveckling och modellutveckling.

11.7.1 Metodutveckling

Mål

De metoder som används för att genomföra och redovisa säkerhetsanalyserna skall tillgodose behovet av syste-

matik i arbetet och i dokumentation, kunna ge en överblick och förståelse för hur arbetet genomförts, samt kunna successivt vidareutvecklas och anpassas till ev olika syften med säkerhetsrapporterna.

Delmål under perioden är att genomföra lämplig metodanpassning så att de i kapitel 10 redovisade säkerhetsanalyserna kan genomföras med erforderlig kvalitet och spårbarhet.

Granskningen av hur metoderna har tillämpats vid varje enskild säkerhetsanalys är en väsentlig del av granskningen av säkerhetsanalysernas tillförlitlighet.

Program

Scenariemetodik

RES-metoden har tillämpats för att visualisera de interaktioner som är väsentliga för förvarets långsiktiga funktion och säkerhet, för att systematisera dokumentationen av fenomen som kan vara av vikt för förvarets funktion, samt för att ge ett stöd i arbetet med att granska hur väl de valda beräkningsfallen täcker djupförvarets olika möjliga utvecklingar.

Erfarenheterna från redovisningen i SR 95 och i säkerhetsrapporten inför tillståndsansökningen för inkapslingsanläggningen (SR-I) kommer att påverka inriktningen av det fortsatta arbetet med scenariemetodiken.

En sammanställning av underlagsmaterial, organiserat enligt RES-matrisen, pågår och kommer att redovisas i dokumentationen för SR-I tillsammans med utvärderingar av utvalda scenarier. I kommande säkerhetsredovisningar skall dessa scenarier successivt anpassas och uppdateras med hänsyn till förändrade förutsättningar och platsspecifik information.

Osäkerheter

En *sammanställning* av olika faktorer som påverkar tilltron till eller osäkerheterna i en säkerhetsutvärdering pågår inför SR-I. Arbetet syftar till att klarlägga olika typer och olika källor till osäkerheter för att ge möjligheter till en systematisk hanteringen av osäkerheterna i säkerhetsanalyserna, och för att belysa deras inbördes betydelse. Då SR-I emellertid inte baseras på en specifik förläggningsplats, kommer diskussionen i vissa delar att vara principiell. Tanken är att denna osäkerhetsgenomgång skall successivt konkretiseras med hänsyn till dels ändrade förutsättningar och platsspecifik information, dels med hänsyn till de specifika frågor olika säkerhetsanalyser avses ge svar på.

Arbetet med att ta fram s k *validitetsdokument* för analysmodellerna fortsätter. Specifika dokument tas fram för viktigare beräkningsmodeller. I dokumentet återfinns en diskussion om användningsområde, teori, konceptualisering, matematisk modellering, verifiering, stödjande experiment och observationer m m.

En väsentlig del av osäkerheterna kan ligga i den *konceptuella beskrivningen* av olika fenomen. De olika

modellerna kan helt enkelt ge olika resultat. En kontroll av hur stora skillnaderna i resultaten kan bli fås genom Äspölaboratoriets Task Force, där för närvarande upp till 11 grupper tillämpar olika modeller för grundvattenrörelser och nuklidtransport på gemensamma exempel från Äspöprojektet. Arbetet inom denna Task Force kommer att fortsätta. Även en av NEA nyligen uppsatt arbetsgrupp kommer att diskutera osäkerheter föranledda av olika konceptualisering.

Kvalitetssäkring

Kontrollen av spårbarhet och kvalitet i säkerhetsanalyserna kommer att följa SKBs kvalitetshandbok och de specifika kvalitetsmanualer som är under framtagning inom projekten för inkapslingsanläggning och djupförvar.

Frågor av specifikt intresse för säkerhetsanalyser är

- validering av modeller som används vid säkerhetsanalyserna,
- versionshantering av datormodeller och ingångsdata,
- dokumentation och spårbarhet av genomförda beräkningar.

Arbetet med att etablera QA-rutiner pågår.

Redovisning

SR 95 utgör bl a ett förslag till standardiserad mall för vad säkerhetsrapporter skall innehålla och hur rapporterna skall läggas upp. Med anledning av eventuella synpunkter från granskningen av SR 95 och av erfarenheter från kommande säkerhetsredovisningar kan denna mall behöva revideras.

Hydrologiberäkningar i tre dimensioner samt stokastiska beräkningar ställer stora krav på god visualisering av resultaten. Insatser planeras för att förbättra resultatpresentationen inför kommande säkerhetsredovisningar.

11.7.2 Modellutveckling

Mål

De numeriska modeller som används för säkerhetsanalyserna och deras databaser skall hållas uppdaterade med hänsyn till förändringar i förståelsen om de grundläggande processerna och med hänsyn till utvecklingen inom datorområdet. De skall vara så anpassade till varandra att de kan kopplas i beräkningskedjor.

Delmål under perioden är att ha en praktiskt användbar modelluppsättning tillgänglig inför genomförandet av varje i kapitel 10 redovisad säkerhetsanalys.

Program

Numerisk koppling av modeller

Utveckling av ett modernt meny-baserat användargränssnitt (MONITOR 2000) till programpaketet för kopplade probabilistiska beräkningar (PROPER) pågår och beräknas vara avslutad under 1995. Programvård och successiva uppdatering förutses under perioden.

Modeller för radionuklidinventarium och resteffekt

Radionuklidinventarium och resteffekt har beräknats med koderna CASMO och ORIGEN 2. En sammanställning av erfarenheterna från genomförda verifieringar och validerande mätningar planeras till säkerhetsrapporten inför utbyggnad och drift av djupförvarets steg 1. Viss anpassning av ORIGEN 2 kan erfordras inför säkerhetsanalyserna av annat avfall.

Modeller för bränsleupplösning/omvandling

Bränsleupplösningen i kontakt med grundvatten har i tidigare beräkningar antingen begränsats via de radioaktiva ämnas lösligheter eller, som i SKB 91, baserats på uppmätta data från lagningsförsök och beräknad tillgång till radiolyssyre.

Under den kommande perioden avses en kinetisk modell för bränsleupplösning tas fram. Den kommer att baseras på det experimentella dataunderlaget från bränslestudierna, se avsnitt 11.2.

Kemisk modellering i närområdet

En realistisk beskrivning av kemin i närområdet är viktig för lösligheter och nuklidtransport. En modell som beskriver hur komponenterna i buffertmaterialet påverkar kemin i och närmast kapseln finns klar. Arbetet fortsätter för att inkludera även kapselmateriale och bränsle. Studierna av inverkan från cement och betong fortsätter.

EQ3/6-koden används för kemiska jämviktsberäkningar. Inget eget utvecklingsarbete förutses för detta. Framtagning och validering av viktiga termodynamiska data pågår fortlöpande, se avsnitt 11.5.

Modeller för nuklidtransport m m i närområdet

SKB använder två olika beräkningsmodeller för nuklidtransport i närområdet: Tullgarn och NUCTRAN.

Tullgarn är, i princip, färdigutvecklad. Utvecklingsarbetet med NUCTRAN kommer att fortsätta. Viktiga områden för denna utveckling är: komplettering med delade lösligheter och beräknad kapselgenombrotts-tid till säkerhetsrapporten inför lokalisering av inkapslingsanläggningen, samt anpassning av modellen för beräkningar av nuklidtransport från SFL 3-5 till säkerhetsrapporten inför start av detaljundersökningar.

Ytterligare modellutveckling planeras för gastransport genom bentonit.

Modeller för transport i fjärrområdet

SKB använder ett antal olika beräkningsmodeller för grundvattenströmning och transport av radionuklider.

Det generella FEM-programmet för grundvattenströmning och nuklidtransportberäkningar, NAMMU, bedöms även framledes kunna utnyttjas för storskaliga studier. Programunderhåll och vidareutveckling genomförs av AEA Technology och SKB har goda möjligheter att påverka kommande utveckling.

HYDRASTAR är ett verktyg för stokastisk kontinuummodellering av grundvattenrörelser. Det kommer att vidareutvecklas, bland annat vad gäller dokumentation, presentation av resultat och användarvänlighet. Stationära och transienta tryckmätningar bör kunna utnyttjas för systematisk kalibrering av grundvattenmodeller. Kommande arbete ska resultera i en systematisk teknik för detta med HYDRASTAR. Vidare kan olika statistiska grundmodeller för beskrivning av bergets heterogena natur prövas för att se vilken inverkan detta har på slutresultaten. En viss utveckling förutses för att möjliggöra detta.

Radionuklidtransport i berget representeras i SKBs modellkedja av en s k strömrörmodell. Flödesvägar från olika delar av djupförvaret genereras av hydrologi-modeller.

Kopplingen mellan hydrologi- och transportmodeller avses dock att förbättras. Dagens strömrörmodell, FARF31, kräver konstanta parametrar för strömvägen, t ex "våt yta" och longitudinell dispersion. Metodik för att variera dessa egenskaper längs strömröret kommer att utvecklas och underlaget kommer att byggas ut.

CHAN3D, är en modell för beräkning av radionuklidtransport där berget anses bestå av ett fåtal vattenförande kanaler med blandning. Modellen är ämnad för beräkningar i regional skala. En utveckling planeras under de närmaste åren främst inriktad mot förbättrad hantering av sprickzoner och dispersion i modellen.

PHOENICS/PARTRACK har av SKB utnyttjats för att belysa densitetsvariationers effekt på grundvattenrörelser. Densitetskontraster uppstår p g a termiska effekter eller salt grundvatten, vilket ofta påträffas djupt i berggrunden. Metoden i PARTRACK beskriver indirekt de processer som påverkar transport av nuklider i sprickigt berg. Förbättringar förutses när det gäller hantering av kedjesönderfall samt metodik för att relatera fältdata för radionuklidretention till parametervärden i PART-RACK.

Modeller för radionuklidens spridning i biosfären

Radionuklidernas transport i biosfären och därav följande doser till människor beräknas med BIOPATH, en "kompartimentmodell" som kan anpassas till godtyckliga initialrecipienter av det djupa grundvattnet.

Beräkningsmodellen har utvecklats och underhålls av Studsvik EcoSafe som också medverkar i den internationella jämförelse och utvärdering av biosfärsmodeller som pågår inom Biomovs. Den vidareutveckling av BIO-PATH som förutses under den kommande 6-årsperioden är främst knuten till att anpassa och pröva modellen på de specifika biosfärsförhållanden som föreligger på kandidatplatserna.

11.8 NATURLIGA ANALOGIER

För de kommande åren prioriteras SKBs medverkan i tre större internationella analogiprojekt: Jordanien, Oklo och Palmottu. Till detta kommer en del smärre studier med begränsade mål och omfattning. Målet för analogiundersökningarna är att ta fram underlag för att validera (pröva) antaganden och modeller för att beskriva långsiktiga processer viktiga för djupförvarets säkerhet.

SKB fortsätter att medverka i den av EU organiserade internationella gruppen NAWG (Natural Analogue Working Group). I NAWG granskas och diskuteras resultaten av de olika undersökningarna kritiskt av internationella experter på området. Härigenom prövas såväl kvaliteten på resultaten som deras användbarhet i säkerhetsanalysen.

11.8.1 Jordanien

Förekomsten av hyperalkaliska källor i Maqarin (aktiva) och i centrala Jordanien (fossila) studeras som analogi till betong i ett djupförvar. Projektet är nu inne i sin tredje fas, som förväntas fortsätta till slutet av 1996. Fas III stöds av HMIP (Her Majesty's Inspectorate of Pollution), NAGRA, NIREX och SKB. Mål för den pågående tredje fasen är följande:

- Bestämma ursprunget till grundvattnet i Western Springs (område i Maqarin) och den kemiska sammansättningen hos vattnet.
- Petrografisk och kemisk analys av textur och mineralfaser som bildats, genom att hyperalkaliskt grundvattnet reagerat med berget.
- Undersöka hur det hyperalkaliska vattnet har påverkat bergets tillgänglighet för indiffusion av radionuklider.
- Pröva beräkningsmodeller som kopplar masstransport med kemisk reaktion och används för att bedöma inverkan av cement i ett förvar.
- Pröva kemiska modeller av fasta lösningar för att beskriva löslighet av spårämnen (Sn, Se, Ni, Pb, Ra, Th och U) i grundvattnet vid högt pH.
- Undersöka zeoliter från Maqarin och se om det stämmer med uppgifter i litteraturen om bildning av zeolit på hyperalkaliska geokemiska förhållanden.

- Undersöka om lermineralen i Maqarin och centrala Jordanien är stabila vid högt pH.
- Undersöka om kolloider bildas och om kolloider eller naturligt organiskt material transporterar spårämnen.

11.8.2 Oklo

Den första fasen av Okloprojektet kommer att avslutas och avrapporteras under 1995. En andra fas har planerats som skall pågå tom 1998. Organisationen har ändrats, men liksom för fas I så söker man även den här gången ekonomiskt stöd från EU. Huvudansvarig för såväl fas I som fas II är franska CEA (men olika grenar av organisationen). SKB avser att delta också i den andra fasen.

Undersökningarna bedrivs på tre olika platser i Gabon där man har hittat rester av naturliga reaktorer: Oklo (dagbrott), Okelobondo (underjordsgruva) och Bangombé (prospekteringsområde). SKBs intresse kommer även i fortsättningen att vara koncentrerat till reaktorzonen i Bangombé.

EUs program på området naturliga analogier och även övriga deltagare har som övergripande mål att pröva modeller, beräkningsprogram och databaser som används inom säkerhetsanalysen. Därför vill man inom fas II koncentrera sig på kvantitativ utvärdering av processer som påverkar retention eller migration av radionuklider. Projektet har formulerat ett antal frågor som man skall försöka besvara:

- Vilka fissionsprodukter och slutprodukter från kärnreaktionerna finns fortfarande kvar?
- Var i zonen, närområdet eller berget har de hållits kvar och i vilken form?
- Vilka retentionsmekanismer har varit aktiva och hur länge?
- Vilket inflytande har de geologiska händelserna haft på retentionen?
- Vilka transportmekanismer har varit aktiva och i så fall när?

Med "geologiska händelser" åsyftas här bl a en inträngning av magma som påverkade ett par av zonerna med en hydrotermal puls och vidare det faktum att t ex zonen i Bangombé kan nås av oxidativ vittring, genom att den med tiden kommit närmare markytan. Utöver målsättningen att besvara frågorna ovan så har man dessutom följande mål för fas II av Okloprojektet:

- Att ta fram modeller för de processer som är viktiga för funktionen hos ett förvar, dvs processer som påverkar material i förvaret eller radionuklidtransport.
- Att pröva dessa modeller på data från det väl karakteriserade naturliga systemet och med vederbörlig hänsyn till begränsningar i tid och rum.

- Att förbättra kunskapen om de naturliga materialens förmåga att hålla kvar radionuklider.
- Att förbättra de databaser som används inom säkerhetsanalysen.
- Att identifiera långsamma processer (tusentals år) som skulle kunna påverka transport av radionuklider.

Inriktningen av fas II avlöser den som tidigare gällde för fas I och var mer grundläggande och mer allmänt geovetenskaplig, d v s att undersöka och beskriva de senast upptäckta reaktorzonerna i Oklo, att följa spåren av fissionsprodukternas migration från reaktorzonerna och att ge en hydrogeologisk beskrivning av områdena som de ser ut idag. Resultaten från fas I blir den grund som fas II bygger vidare på.

11.8.3 Palmottu

Fortsättningen av analogiundersökningarna i Palmottu önskar man från bl a finsk sida (GTK) bedriva som ett internationellt projekt. Man har därför utvidgat samarbetet och söker ekonomiskt stöd från EU. Det nya Palmottuprojektet skall enligt planerna påbörjas 1995 och slutrapporteras till 1999. Palmottu har fördelen av att erbjuda samma berggrund och förhållanden i övrigt som är allmänt förekommande i Sverige.

Målen för det nya Palmottuprojektet är följande:

- Ge en kvantitativ beskrivning av uran-torium-förekomsten som ligger i granitiskt berg nära sjön Palmottu.
- Granska den relativa betydelsen av processer som kontrollerar vattenflöde i kristallint berg.
- Undersöka och modellberäkna inverkan av geochemisk oxidation och reduktion på rörligheten hos radionuklider i kristallint berg.
- Utreda betydelsen av olika mekanismer för retardation av radionuklider.
- Undersöka betydelsen av upprepade nedslagningar (istider) på bergets egenskaper.
- Använda kunskap och data från studierna till att utveckla och förfinna modeller som används inom funktionsanalys och säkerhetsanalys.

11.8.4 Övrigt

Utöver de redan nämnda studierna undersöks även andra uppslag. Ett sådant utgörs av naturliga evidens för retention av cesium. Cesiumjoner antas i säkerhetsanalysen vara tämligen lättrorliga, men det motsägs av de erfarenheter man har från spårförsök. Det kan möjligen bero på att cesium är känsligt för de mineral som utgör substratet för sorption. Till exempel binder lerpartiklar cesium nära nog irreversibelt. Det är således angeläget att hitta exempel på transport av cesium i berget som kan leda till en mer realistisk (mindre konservativ) beräkningsmodell.

11.9 ANNAT AVFALL OCH SFR-AVFALL

Med en gemensam beteckning kallas allt låg- och medelaktivt avfall som skall gå till djupförvaret för "annat avfall". Bortsett från det något högre innehållet av långlivade isotoper i en del av avfallet, så har det mycket gemensamt med SFR-avfallet. Avfallet utgörs av filtermassor, slam, skrot och sopor som packats i behållare av betong och stål, och vid behov konditioneras med betong. På grund av likheterna kan erfarenheterna från SFR i stor utsträckning användas för design och funktionsanalys av SFL 3-5. Kompletterande undersökningar för SFR och nya studier för SFL 3-5 kan i flera fall genomföras gemensamt.

11.9.1 Annat avfall

Mål

Målet för stödjande FUD beträffande annat avfall är att förbereda kommande säkerhetsanalyser och att pröva förslag till utformning av denna del av djupförvaret. För att kunna nå de målen behövs uppgifter på avfallens mängd och sammansättning, samt hur avfallet packats etc.

Delmål för perioden är att därvid:

- genomföra och avrapportera FAS II i pågående förstudier,
- sammanställa underlagsmaterialet till en säkerhetsanalys och projektering inför tillståndsansökan för detaljerade undersökningar för ett djupförvar.

Program

Internationellt samarbete

Långlivat låg- och medelaktivt avfall finns framförallt i länder med uppberedning, t ex Frankrike, Storbritannien, Tyskland, Japan, USA och Belgien. Vid uppberedning hamnar en del långlivade radionuklider i det låg- och medelaktivt avfallet. I flera länder har man därför avancerade program för planering, förvarsdesign, forskning och säkerhetsanalys som avser långlivat låg- och medelaktivt avfall. SKB följer den internationella utvecklingen. Ett informellt samarbete har etablerats med organisationer i Frankrike (ANDRA), Schweiz (NAGRA) och Storbritannien (NIREX).

Förstudie, fas II

Att enbart förlita sig på den internationella utvecklingen på området och på erfarenheter från SFR, är inte helt tillräckligt för att förbereda en säkerhetsanalys för annat avfall. Det är nödvändigt att genomföra experimentella undersökningar som inte utförs på annat håll. Det finns modeller som behöver prövas och anpassas till våra förhållanden. En del av experimenten tar lång tid i an-

språk och behöver startas i god tid. Detta var ett viktigt motiv till den förstudie som genomfördes 1993-94. Förstudien har styrt planeringen av ytterligare experiment. Målet för fas II är att förbereda en säkerhetsanalys som planeras komma igång mot slutet av 1996.

Fas II startade i oktober 1994 och följande delar ingår:

- Sammanställa tabeller över radionuklidinnehåll och sammansättning hos avfallet för att användas i säkerhetsanalysen.
- Sammanställa en kemisk databas med information om vattenkemi (i förvaret), betongens sammansättning och kemi, radionuklidsorption, diffusion och löslighet, organiska komplex och kolloider.
- Analysera alternativa scenarier (t ex istid) samt betydelsen av vattenflödet i berget, kolloider, mikrober och gasbildning.
- Sammanställa uppgifter om barriärernas egenskaper; avfallskollin, betongkonstruktioner, berget i närområdet, återfyllnad bestående av betong, bentonit eller sand.
- Jämföra olika designalternativ.
- Utveckla och testa transportmodeller.

Den sista punkten anknyter till programmet för säkerhetsanalys av djupförvaret för använt bränsle. Målet är att använda samma beräkningsmodeller för alla delar av djupförvaret.

Undersökningarna präglas av kemiska frågeställningar, såsom betongens stabilitet, betongens påverkan på omgivningen, korrosion, organiska komplex, löslighet, sorption och diffusion av radionuklider o s v. En del av studierna tar även sikte på kompletterande undersökningar för SFR. Det gäller i synnerhet nedbrytning av cellulosa och de produkter som därvid bildas.

Med undantag för den analys av de hydrogeologiska förutsättningarnas betydelse som ingår fas II, så finns det inget separat program för stödjande FUD för SFL 3-5 på det geovetenskapliga området, utan det inryms inom det allmänna programmet för djupförvaret. Möjligen behövs en del anpassningar av beräkningsmodeller för vattenflöde och transport så att även analys av SFL 3-5 inryms.

F n ingår inte fältstudier och in-situ undersökningar i planen. Först i ett senare skede kan sådana bli aktuella. Tillsvidare utnyttjas främst erfarenheterna från SFR-anläggningen. En del av resultaten från Äspölaboratoriet kan även utnyttjas.

Gammal betong och naturliga analogier, där cementliknande förhållanden varit rådande under lång tid, kan ge information om de förändringar som sker i betongen. Undersökningar av gammal betong baserad på Portlandcement och studier av hyperalkaliska geokemiska förhållanden i Jordanien ingår SKBs FUD-program, se avsnitt 11.8. Det finns geokemiska modeller som beskriver påverkan av alkaliskt vatten på bergmineral, men de behöver underbyggas ytterligare. Laborrieförsök som ut-

förs av BGS (British Geological Survey) är steg i den riktningen, se avsnitt 11.5

11.9.2 SFR-avfall

Enligt gällande drifttillstånd för SFR-1, etapp 1, skall förnyade säkerhetsanalyser genomföras vart tionde år, så länge anläggningen är i drift. Vidare skall en förnyad säkerhetsredovisning inlämnas som underlag för ansökan om tillstånd för förslutning av anläggningen. Ett ytterligare villkor i drifttillståndet är att så länge anläggningen är i drift skall ett särskilt kontrollprogram vidmakthållas, för inhämtande av platsspecifik kunskap.

Generiska kunskaper erhålls bl a från de studier och undersökningar som enligt ovan bedrivs eller kommer att bedrivas för SFL 3-5 samt från den internationella utveckling som följs inom projektet. Genom att bedriva arbetet med SFL 3-5 i nära samarbete med SFR säkerställs att information och kunskap överförs mellan de två anläggningarna/projekten.

Inför de kommande säkerhetsanalyserna och inför förslutning av anläggningen genomförs ett särskilt kontrollprogram med syftet att inhämta platsspecifika erfarenheter. Kontrollprogrammet omfattar registrering av grundvattentryck, bergdeformationer, inläckande vattenmängder, grundvattnets kemiska sammansättning samt återkommande besiktning av berget.

För siloförvaret genomförs uppföljning av betongsilons rörelser samt av vattenupptagning i bentonitfyllningen i spalten mellan betongsilo och berg (svälltryck). För den övre delen av spaltfyllningen studeras även bevätningen i syfte att se hur mycket av bentoniten som behöver ersättas i samband med förslutningen av silotoppen. En genomgång av kontrollprogrammet sker årligen och erfarenheterna överförs till kommande års program. En totalöversyn av programmets utformning, omfattning och relevans genomförs med tre till fem års mellanrum. Vid dessa tillfällen beaktas den utveckling och erfarenhet som erhållits inom andra projekt inom SKB likväl som den internationella kunskapsutvecklingen.

Behov av ökad kunskap om långtidsegenskaperna för vissa avfallsmaterial och tillsatsmedel har identifierats. För organiskt material är dagens kunskap om dess långtidsegenskaper begränsad. Detta gäller framför allt nedbrytningsprodukter från cellulosa och dessas möjliga komplexbildning med radioaktiva ämnen som t ex Pu. En separat studie understödd av försök med cellulosa-nedbrytning pågår och den viktigaste nedbrytningsprodukten (isosackarinsyra) har kunnat identifieras. Denna och andra ämnens långtidsegenskaper studeras och tills vidare kontrolleras och begränsas administrativt mängden organiskt material i de olika förvarsutrymmena.

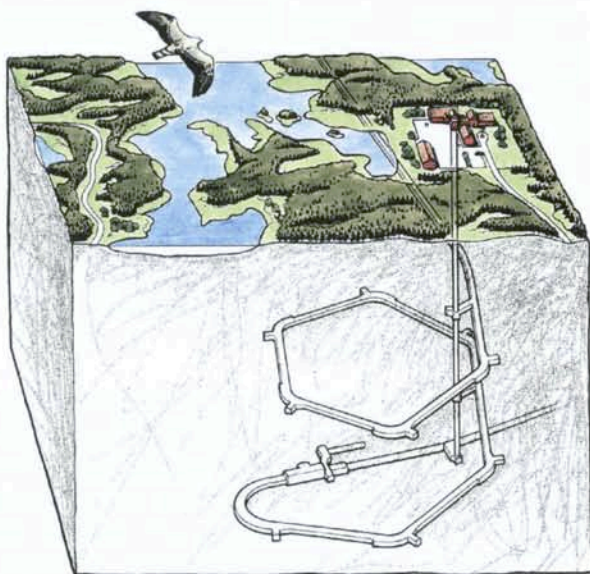
Hantering och deponering av större och udda komponenter, främst metallskrot, granskas i ett separat projekt där olika avfallsformer och fördelning mellan olika förvar studeras.

12 PROGRAM FÖR ÄSPÖLABORATORIET

12.1 INLEDNING

Äspölaboratoriet utgör en viktig del av SKBs arbete med att utforma ett djupförvar och att utveckla och pröva metoder för att undersöka en lämplig plats. Ett förslag om byggande av ett underjordiskt berglaboratorium lades fram i FoU-program 86 /12-1/ och fick ett mycket positivt mottagande av remissorganen. Under hösten 1986 påbörjade SKB fältarbeten för lokalisering av det underjordiska berglaboratoriet till Simpevarpsområdet i Oskarshamns kommun. I slutet av 1988 fattade SKB ett principbeslut om lokalisering av laboratoriet till södra Äspö ca 2 km norr om Oskarshamnsverket. Efter myndighetsprövning och godkännande inleddes anläggningsarbeten hösten 1990.

Äspölaboratoriet har utformats för att tillgodose de behov som den planerade forsknings-, utvecklings- och demonstrationsverksamheten kan komma att kräva. Undermarksdelen är utformad som en tunnel från Simpevarpshalvön till södra delen av Äspö. På Äspö går tunneln i två varv ner till ett djup av 450 m, se Figur 12-1. Tunnelns totala längd är 3600 m. De sista 400 metrarna bröts ut med en tunnelborrningsmaskin (TBM) med 5 meters diameter. Den första delen av tunneln är utbruten genom sprängning. Undermarksdelen är ansluten till ovanjordsdelen med ett hisschakt och två ventilationschakt. Ovan jord finns Äspö By med kontorsutrymmen, förråd samt hiss- och ventilationsbyggnad /12-2/, se Figur 12-2.



Figur 12-1. Översiktsvy över Äspölaboratoriet.

Arbetet med Äspölaboratoriet indelas i tre skeden – förundersöknings-, anläggnings- och driftsskedet. Under **förundersökningsskedet**, 1986-1990, skedde lokalisering av Äspölaboratoriet. De naturliga förhållandena i berggrunden beskrevs och förutsägelser gjordes med avseende på de geohydrologiska m fl förhållanden som skulle observeras under anläggningskedet /12-3/. Planering för byggnads- och driftsskedet genomfördes.

Under **anläggningskedet**, 1990-1995, genomfördes omfattande undersökningar och försök parallellt med anläggningsverksamheten. Utbyggnaden av tunneln till 450 m djup och anläggandet av Äspö By slutfördes. Äspö By togs i drift under sommaren 1994. Anläggningsarbetena under jord slutfördes under sommaren 1995.

Driftsskedet inleddes 1995. I detta program anges inriktningen på de undersökningar och försök som planeras bli genomförda under driftsskedet. Ett preliminärt program för dessa arbeten presenterades redan i en underlagsrapport till FUD-program 92 /12-4/.

12.2 MÅL

Ett av de grundläggande motiven bakom SKBs beslut att anlägga Äspölaboratoriet var att skapa en möjlighet till forskning, utveckling och demonstration i en realistisk och ostörd bergmiljö ned till det djup som planeras för det framtida djupförvaret. Vid planering och utformning av verksamheten vid Äspölaboratoriet kommer projekt att prioriteras som syftar till att

- öka den vetenskapliga förståelsen om djupförvarets säkerhetsmarginaler,
- utveckla och testa teknik som minskar kostnader och förenklar slutförvarskonceptet med bibehållen hög kvalitet och säkerhetsnivå,
- demonstrera den teknik som kommer att användas vid deponering av använt kärnbränsle och annat långlivat avfall.

För att uppfylla den övergripande tidsplanen för SKBs FUD-arbete ställdes följande etappmål upp för verksamheten vid Äspölaboratoriet i FoU-program 89 /12-5/:

- 1 Verifiera förundersökningsmetoder.
- 2 Fastställa detaljundersökningsmetodik.
- 3 Pröva modeller för grundvattenströmning och radionuklidmigration.
- 4 Demonstrera bygg- och hanteringsmetoder.
- 5 Pröva viktiga delar i förvarssystemet.

I och med att driftsskedet nu inleds finns det anledning att revidera och precisera målen för Äspölaboratoriet



Figur 12-2. Översiktsvy över Åspö By.

mot bakgrund av de erfarenheter som hittills vunnits. För driftsskedet ges etappmålen följande lydelse

- 1 Verifiera förundersökningsmetoder**
 - Demonstrera att undersökningar på markytan och i borrhål ger tillräckliga data om väsentliga säkerhetsrelaterade egenskaper hos berget på förvarsnivå.
- 2 Fastställa detaljundersökningsmetodik**
 - Vidareutveckla och verifiera de metoder som behövs vid karakterisering av berget vid detaljundersökning av en plats.
- 3 Pröva modeller för beskrivning av bergets barriärfunktion**
 - Vidareutveckla och på förvarsdjup pröva metoder och modeller för beskrivning av grundvattenflöde, radionuklidmigration och kemiska förhållanden under förvarets driftsperiod samt efter förslutning.
- 4 Demonstrera teknik för och funktion hos viktiga delar i förvarssystemet**
 - I full skala pröva, undersöka och demonstrera olika komponenter som har betydelse för långtidssäkerheten hos ett djupförvarssystem och visa att det går

att säkerställa hög kvalitet i utformning, byggande och drift av systemets komponenter.

Åspölaboratoriet utgör en viktig del av det arbete som bedrivs inom SKBs FUD-program. Kraven på forskningens kvalitet är mycket höga och en övergripande ambitionsnivå är att Åspölaboratoriet utvecklas till ett internationellt ledande centrum för forskning, utveckling och demonstration rörande anläggningar för djupförvaring av högaktivt avfall.

12.3 RESULTAT – NUVARANDE LÄGE RELATIVT ETAPP-MÅLEN

Det första etappmålet, Verifiering av förundersökningsmetoder, anser SKB vara uppfyllt i och med slutförandet av anläggningsskedet och att de undersökningar och forskningsarbeten som gjorts i samband därmed rapporteras. De resultat och erfarenheter som erhållits från undersökningar under förundersöknings- och anläggningsskedena och jämförelsen av förutsägelser och faktiskt utfall slutrapporteras under 1995 och början av 1996. En sammanfattning av hittills vunna erfarenheter

och preliminära slutsatser från detta arbete redovisas i avsnitt 8.2.2. Resultaten i stort visar att de metoder som finns tillgängliga för att undersöka berg är väl ägnade att ta fram den kunskap och de data om bergrunden som behövs för att anlägga ett djupförvar och visa att detta uppfyller säkerhetskraven.

Vad avser det andra etappmålet, Fastställa detaljundersökningsmetodik, så har mycket erfarenhet vunnits om tillämpningen av många olika undersökningsmetoder under jord, i synnerhet vad avser samordning av detaljerade undersökningar med tunnelbyggande. De undersökningsmetoder som använts för detaljundersökningarna i samband med byggandet av Äspötunneln kommer att redovisas i en rapport motsvarande den som sammanfattar erfarenheterna från förundersökningsskedet /12-6/. Denna rapport avses ge en redovisning av hittills vunna erfarenheter för varje använd metod. Ett program för detaljundersökningar på en vald plats behöver utarbetas med utgångspunkt från de erfarenheter som vunnits från hittills genomförda arbeten på Äspö enligt de riktlinjer som redovisas i kapitel 9.

Stora framsteg har gjorts relativt det tredje etappmålet, Pröva modeller för grundvattenströmning och radionuklidtransport, speciellt vad avser modellering av grundvattenflöde. I Äspölaboratoriets regi har tredimensionella modeller utvecklats som kan beskriva flöde av grundvatten med varierande salthalt inom en volym tillräckligt stor för att vara representativ för ett djupförvar /12-3, 7, 8/. Förmågan att ta fram representativa data för att beskriva grundvattenflöde och radionuklidtransport studeras i en internationell arbetsgrupp, s k Task Force, där data från Äspö används i flera principiellt olika grundvattenflödesmodeller, se avsnitt 5.5.8 för en mer detaljerad redogörelse /12-9-7/. Allmänt sett har hittills god överensstämmelse erhållits mellan modellerna och verkligheten /12-18/. Fortsatt arbete planeras inom detta område, framför allt för att få ytterligare underlag för att pröva modeller för transport av radionuklider som reagerar med bergets mineral, s k sorption, vilket ger en långsammare transport av radionukliderna än av det strömmande grundvattnet.

Anläggningen av Äspölaboratoriet har givit värdefulla erfarenheter vad avser det fjärde etappmålet, Demonstrera bygg- och hanteringsmetoder, framför allt genom att tunneldrivning utförts både med konventionell sprängning och borrar och med en tunnelborrningsmaskin (TBM). Detta ger underlag för val av brytningsmetodik i djupförvaret.

12.4 FASTSTÄLLANDE AV DETALJUNDERSÖKNINGS- METODIK, PROGRAM FÖR 1996-2001

12.4.1 Allmänt

Detaljundersökningar för ett djupförvar av använt kärnbränsle syftar till att

- bekräfta att en lämplig förvarsvolym finns tillgänglig,
- ge tillräckligt underlag för den säkerhetsanalys som behövs för att erhålla tillstånd för utbyggnad av ett slutförvar samt
- ge data så att förvarssystemet kan optimeras med hänsyn till tekniska barriärer och geometrisk utformning.

Inom ramen för etappmålet genomförs detaljerade undersökningar av den störda zonen runt sprängda och borrarade tunnlar, utvecklas interaktiva datorsystem för tolkning av mätdata och design av förvaret samt instrument för undersökningar under jord.

12.4.2 ZEDEX – En studie av den störda zonen för sprängd och borrarad tunnel

Bakgrund

Utbyggnad av en tunnel eller ett hålrum i berget förändrar bergets egenskaper i närheten av tunneln, den så kallade störda zonen, vilket kan ha betydelse för förhållandena i förvaret innan förslutning och förvarets långsiktiga funktion. För att få en bättre förståelse för den störda zonens egenskaper och betydelsen av olika brytningsmetoder har ANDRA, UK Nirex och SKB gått samman för att genomföra en gemensam studie av den störda zonen som getts namnet ZEDEX. Resultaten förväntas vara av betydelse för valet av brytningsmetod eller den kombination av brytningsmetoder som kommer att användas i djupförvaret.

Mål

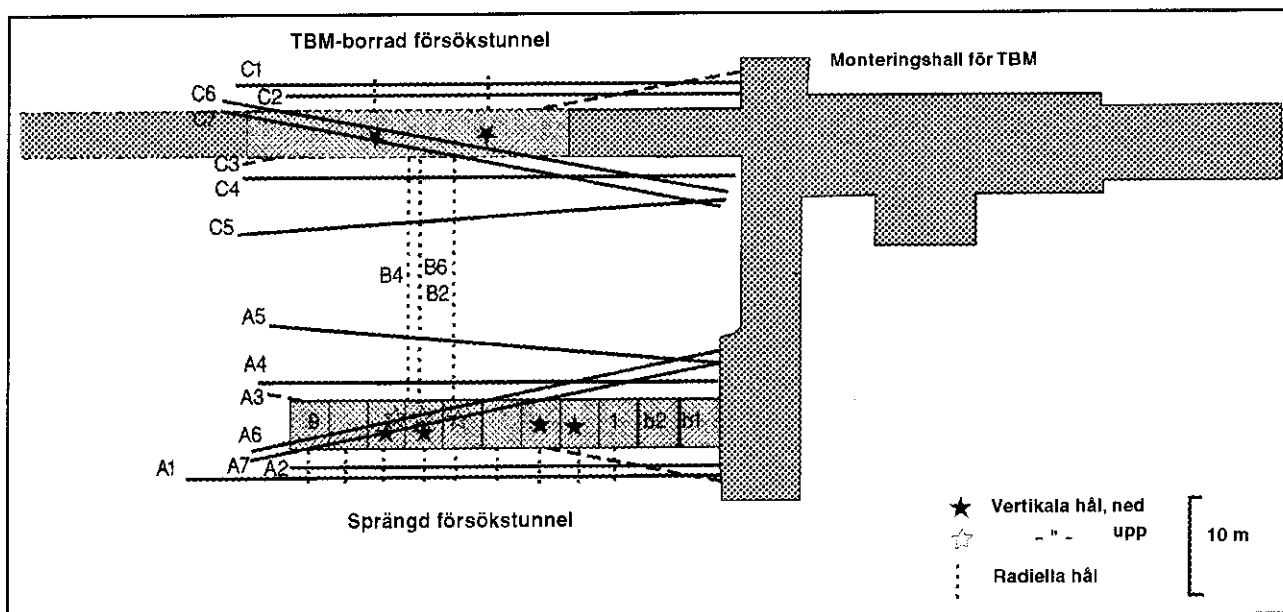
ZEDEX-projektets mål är

- att öka förståelsen av den störda zonens mekaniska egenskaper med avseende på dess ursprung, karaktär, förändring i egenskaper, geometrisk utbredning samt dess beroende av brytningsmetod,
- att genomföra undersökningar för att öka förståelsen av den störda zonens hydrauliska betydelse samt
- att pröva utrustning och metodik för kvantifiering av den störda zonens egenskaper.

Utförande

Projektet omfattar undersökning berget kring två parallella tunnlar på ca 420 m djup. Den ena tunneln utgörs av de första 40 metrarna av den TBM-borrarade delen av Äspölaboratoriets huvudtunnel. Den andra tunneln utgörs av en ca 40 m lång sprängd tunnel. Båda tunnlar har cirkulär profil och 5 m diameter.

Ett antal undersökningshål har borrarats dels längs med de båda tunnlar och dels radiellt, se Figur 12-3. Mät-



Figur 12-3. Läget på ZEDEX-projektets försökstunnlar och undersökningsborrhål.

ningar i undersökningshålen har genomförts före, under och/eller efter utbrytning av tunnarna. Den störda zonen egenskaper har kvantifierats genom mätning av:

- acceleration,
- berg rörelser,
- seismisk hastighet,
- resistivitet,
- observation av naturliga och inducerade sprickor,
- temperatur,
- akustisk emission från mikrosprickbildning,
- bergspänningar.

Dessutom har seismik och radar använts för att beskriva rumsliga förändringar i bergets egenskaper. En detaljerad beskrivning av projektet ges i /12-19/.

ZEDEX påbörjades i april 1994 med borrning av undersökningshål och mätningar i dessa. TBM-borrning genom försöksområdet genomfördes i juni 1994. Undersökningar för den sprängda tunneln genomfördes under perioden november 1994-maj 1995. Därefter följer utvärdering och slutrapportering som beräknas vara klar i början av 1996. Preliminära resultat visar på en mycket liten inverkan på berget vid TBM-borrning /12-2, 20/.

Under 1996 planeras vissa kompletterande mätningar och en fördjupad analys och numerisk modellering av erhållna resultat för att ytterligare öka förståelsen av den störda zonen hydrauliska och mekaniska egenskaper.

12.4.3 Rock Visualization System

Bakgrund

Uppbyggnad av en bergmodell för en plats sker successivt genom insamling och bearbetning av data. Dessa

data kommer att samlas i SKBs geodatabas, SICADA (se även 8.2.5). Dessutom kommer geologiskt och geofysiskt kartmaterial att vara samlat i SKBs GIS-system. Erfarenheterna från undersökningarna vid Äspölaboratoriet visar att det under karakteriseringen av en plats är viktigt att ha tillgång till ett interaktivt 3D CAD-system som möjliggör att i 3D pröva olika möjliga konnektioner av observationer i borrhål och på marken under arbetet med att bygga en modell av bergets struktur. En snabb visualisering av strukturmodellen gör det möjligt att utifrån befintlig information kunna optimera fortsatta undersökningar. I projekteringen av ett djupförvar kommer 3D modellen av berget utnyttjas för att optimalt anpassa anläggningens utformning (layout) till bergets geometriska struktur. Då flera olika grupper kommer att arbeta med data från en platsundersökning är det viktigt med ett gemensamt 3D CAD-system där alla data kan behandlas och visualiseras.

För att möta dessa krav påbörjade SKB i slutet av 1994 framtagandet av det interaktiva 3D CAD-verktyget Rock Visualization System.

Mål

Målet är att vidareutveckla ett kommersiellt tillgängligt CAD-system till ett verktyg

- som i en datormodell kan simulera bergets huvudsakliga uppbyggnad med avseende på bergartskroppar och diskontinuiteter (sprickzoner),
- som kan användas till att lägga in och anpassa en underjordsanläggnings layout till bergförhållandena,
- som kan visualisera resultat från undersökningar, befintliga och planerade borrhål och anläggningsdelar i olika skalor samt

- som medger att uppbyggnaden av datormodellen kan ske på ett arbetseffektivt och användarvänligt sätt med utnyttjande av aktuell information från projektets databas.

Utförande

Rock Visualization System görs som en programvarutillämpning till det kommersiellt tillgängliga 3D CAD-verktyget INTERGRAPH MicroStation.

12.4.4 Hydrotestutrustning för underjordsmätning

Bakgrund

För ovanjordsmätningar har SKB tillgång till vad som kan kallas för standardutrustningar för hydrauliska injektionstester och pumpstester. För underjordsbaserade mätningar, dvs mätningar i borrhål från tunnlar eller schakt, ställs delvis andra krav avseende mätteknik, robusthet och anpassning till mätplatsens begränsningar. Under Äspölaboratoriets utbyggnadsetapp har hydrauliska tester utförts med olika utrustningar och värdefulla erfarenheter har vunnits. De kritiska kraven vid underjordstesterna har varit kopplade till höga tryck och stora vattenflöden, en kombination som ger större krav på utrustning ju djupare ner i berget mätplatsen är belägen. Erfarenheterna från hittills utförda arbeten visar på behovet av en flexibel, lätthanterlig och säker hydrotestutrustning som snabbt kan etableras vid mätplatser under jord.

Mål

Målet är att ta fram en hydrotestutrustning som kan användas för flertalet hydrauliska tester som kan komma att utföras inom ramen för Äspölaboratoriets olika experiment eller i ett framtida djupförvar.

Utförande

En kravspecifikation upprättas som baserar sig på förslag och önskemål från ansvariga för framtida experiment och erfarenheter från hittills genomförda underjordstester med hänsyn till begränsningar av teknisk och ekonomisk art.

För att uppnå satta krav på flexibilitet och lätthanterlighet kommer utrustningen i princip att bestå av moduler. Av dessa kommer riggen för inmatning av olika borrhålssonder att vara den "tunga" enheten. Styr- och mätenheten skall kunna hantera flera olika sonder för olika testmetoder. Syftet är att systemet ska vara förbättrat även för framtida nya mätmetoder och mätsonder. Ett annat viktigt krav är robusthet och miljötålighet.

12.4.5 Test och vidareutveckling av undersökningsmetodik för detaljundersökningar

Bakgrund

Ett program för detaljundersökningar kommer att utarbetas inom ramen för djupförvarsprojektet. I samband med drivningen av Äspötunneln har flera olika undersökningsmetoder prövats och utvärdering av dessa metoders användbarhet i samband med detaljundersökning för ett djupförvar pågår. De preliminära erfarenheterna från Äspö visar att det finns ett behov för vidareutveckling av vissa metoder för att öka kvaliteten på insamlade data, öka effektiviteten samt att förbättra tillförlitligheten i en krävande underjordsmiljö.

Mål

Att prova befintliga och nya metoder där oklarhet råder beträffande metodernas användbarhet för detaljundersökningar. De metoder som ska testas väljs utifrån deras potentiella användning inom de detaljundersökningsstrategier som utvecklas inom djupförvarsprojektet.

Att vidareutveckla viktiga metoder i ett detaljundersökningsprogram för att öka datakvalitet, effektivitet och tillförlitlighet.

Utförande

Program för test och vidareutveckling av undersökningsmetoder utformas när erfarenheterna från Äspölaboratoriets byggskede utvärderats. För de geofysiska undersökningsmetoderna seismik och radar kan det vara aktuellt att utvärdera metodikernas användbarhet och beroende av olika tunnel- och borrhålsayouter samt att pröva kommersiell teknik som inte tidigare provats av SKB. Det kan också vara aktuellt att testa ny metodik för dokumentation av tunnlar och schakt.

12.5 TEST AV MODELLER FÖR BESKRIVNING AV BERGETS BARRIÄRFUNKTION, PROGRAM FÖR 1996-2001

12.5.1 Allmänt

Berget som omger förvaret utgör en naturlig barriär mot utsläpp av radionuklider till biosfären. Bergets viktigaste funktioner är att skydda de tekniska barriärerna genom att säkra långsiktigt stabila kemiska och mekaniska förhållanden samt begränsa transport av korroderande och av radioaktiva ämnen genom en långsam och stabil grundvattenomsättning. I säkerhetsanalyser beskrivs bergets barriärfunktion med olika modeller.

Inom ramen för detta etappmål genomförs projekt med syfte att utvärdera användbarhet och tillförlitlighet hos olika modeller samt att utveckla och pröva metoder för bestämning av parametrar som ingår i modellerna. En viktig del av detta arbete utförs i Äspölaboratoriets internationella arbetsgrupp för modellering (Äspö Task Force on Groundwater Flow and Transport of Solutes, se även 5.5.8). I arbetsgruppen knyts modelleringsarbetet till pågående och kommande experiment vid Äspölaboratoriet vilket medför att experimenten kan planeras och utvärderas bättre. Arbetet inom Task force-gruppen kommer att fortsätta under perioden med specificerade uppgifter där olika modellgrupper arbetar med samma uppsättning fältdata. Resultaten utvärderas sedan av deltagare från de internationella organisationer som deltar i Äspölaboratoriet. Vid utvärderingen betonas de lärdomar som kan dras för kommande platsundersökningar och säkerhetsanalyser.

Studier genomförs även av den störning som byggande och drift av ett förvar innebär för att säkerställa att störningen inte har en negativ inverkan på förvarets långsiktiga säkerhet.

12.5.2 Klassificering och karakterisering av sprickor (Fracture Classification and Characterization, FCC)

Bakgrund

Berggrundens spricksystem har varierande ursprung och utseende. Det är den geologiska historien som påverkat sprickorna genom rörelser och omvandlingar av sprickmineral. Resultatet av denna utveckling har lett till sprickor av olika karaktär t ex med avseende på riktning, längd, sprickmineral och omvandling av sidoberget (se avsnitt 5.5). Det går troligen att knyta sprickornas geologiska karaktär mot deras förekomst och egenskaper som vattenledare och transportvägar för radionuklider.

Mål

Projektets mål är att ta fram relevanta koncept och data på sprickegenskaper som kan hanteras i radionuklidtransportmodeller och som är baserad på en sortering av sprickorna i ett fåtal relevanta klasser.

Utförande

En preliminär sprickkarakterisering och klassificering baserad på geologisk kartering har genomförts under 1994. Resultatet visar att en uppdelning i enkla och komplexa sprickor kan göras och att dessa kan tillskrivas olika egenskaper /12-21/. Detta följs av provtagning för kvantifiering av sprickornas egenskaper medelst laboratorieanalyser.

Projektet är idag ett samarbete mellan SKB och NAGRA och kommer att slutrapporteras under 1996.

En fortsättning av projektet med inriktningen att studera den naturliga förekomsten av cesium, strontium och andra radionuklider i olika typer av sprickor kommer att övervägas.

12.5.3 Tracer Retention Understanding Experiments – TRUE

Bakgrund

De processer som är av betydelse för bergets förmåga att begränsa transport av olika ämnen beskrivs i avsnitt 5.5.6. För de flesta ämnen lösta i vatten sker transporten av ämnet långsammare än grundvattnets genomsnittliga flödes hastighet. Detta beror på ett flertal olika processer som ger upphov till en uppbromsning av de lösta ämnena relativt det strömmande grundvattnet. Viktiga processer är dispersion och retention. Retentionen (uppbromsningen) orsakas av följande mekanismer:

- Radionuklider sorberar på mineralytor där grundvattnet rör sig.
- Radionuklider diffunderar ut från vattenförande sprickor till det stagnanta vattnet i mikroporer i berget, och sorberas på mineralytorna där.

Även icke-sorberande ämnen fördröjs genom att de uppehåller sig i det stagnanta vattnet i mikroporerna och på så vis undandras transporten i det flödande vattnet i vattenförande sprickor. Radionuklidretention enligt detta mönster är väsentlig och refereras ofta till som "matrisdiffusion".

För att utveckla förståelsen av radionuklidretention i berget samt skapa förtroende för att de radionuklidtransportmodeller som avses bli använda i licensieringen av ett djupförvar för använt bränsle är realistiska har ett program för spår försök i olika skalor utformats. Programmet har givits namnet Tracer Retention Understanding Experiments (TRUE) och är beskrivet i /12-22/.

Grundidén är att genomföra en serie spår försök med gradvis ökande komplexitet. I princip kommer varje spår försök att innehålla en serie aktiviteter som inleds med geologisk karakterisering av försöksområdet, följt av hydrauliska- och spårämnesförsök, avslutningsvis kommer epoxy eller något liknande ämne att injiceras, försöksvolymen att grävas ut och bergproverna att analyseras med avseende på flödesvägar och spårämneskoncentration. Den första försökscykeln som genomförs i liten skala, har begränsad tidsutsträckning och riktas främst in mot teknikutveckling. Följande försök kommer att pågå under längre tid för att kunna studera olika retentionsmekanismer. Spårämnesförsök i både blockskala (10-100 m) och detaljskala (1-10 m) kommer att genomföras i samma bergvolym. Detta ger en grund för att förstå skalningsrelationer samt att pröva modeller för radionuklidtransport i 50 m skala.

Experimentprogrammet är utformat för att ta fram data för konceptuell och numerisk modellering med regelbundna intervall. Regelbunden utvärdering av försöksresultaten kommer att ge en grund för planering av följande försökscykler. Detta borde ge en nära integration mellan experiment- och modellarbete. Detaljerade planer för spår försöken utarbetas successivt under programmets gång.

Mål

Målen för TRUE-programmet är:

- att fördjupa kunskaperna om radionuklidtransport och retention i sprickigt berg,
- att utvärdera användbarhet och tillförlitlighet för olika modellansatser,
- att utveckla och pröva metoder för att bestämma viktiga transportparametrar samt
- att bestämma värden på viktiga transportparametrar in-situ.

Utförande

TRUE-programmet har indelats i etapper och en detaljerad plan har hittills tagits fram för den första etappen som beräknas vara slutförd i början av 1997. De detaljerade planerna för etapp 1 finns redovisade i en Test Plan /12-23/. Den första etappen är framför allt inriktad på utveckling av teknik för spår försök i detaljskala och för karakterisering av porvolymen genom injicering av epoxy samt utveckling av svagt sorberande spårämnen.

Den första etappen innefattar identifiering och karakterisering av en spricka eller sprickzon på ett avstånd av 10-20 m från en befintlig ort. Därefter genomförs spår försök med flera olika vattentrogna spårämnen under olika randvillkor, se Figur 12-4. Försöket genomförs i nära samarbete med Äspölaboratoriets Task Force som löpande får del av försökets resultat för tillämpning i olika transportmodeller samt ges möjlighet att påverka utformningen av försöken. Detta borgar för det nära samarbete mellan experimenter och modellörer som behövs för att vidareutveckla modeller på detta område.

Parallellt med fältarbetet sker utveckling av teknik för karakterisering av porvolymen. Ett eller flera pilotförsök kommer att genomföras innan epoxy eller något annat lämpligt ämne injiceras i den spricka i vilken spår försöken utförts. Inför etapp 2 genomförs utveckling av svagt sorberande spårämnen och provning av deras egenskaper på Äspöberg.

Under 1996 kommer planering att inledas för genomförande av spår försök i blockskala (10-100 m). Detaljplanering av etapp 2 av de detaljerade spår försöken kommer att genomföras på basis av de erfarenheter som vunnits i etapp 1.

12.5.4 REX – Redoxförsök i detaljskala

Bakgrund

Grundvattnets redoxförhållanden under naturliga förhållanden är väl kända /12-24/. Under tunnelbyggnads- och driftfasen kan den ökade vattenomsättningen påverka redoxförhållandena utöver det som gäller under ostörda förhållanden. Effekten av att syresatt ytvatten snabbt transporteras ned i berget har undersökts i det sk blockskaliga redoxexperimentet som pågått 1991-1993 i Äspötunneln.

Resultaten visar att i detta fall och andra där halten av organiskt material i det inströmmande ytvattnet överstiger 10 mg/l kommer bakteriella processer att förbruka syret nära markytan. Ett beräknat redoxgenombrott på 70 m djup uteblev fullständigt, även om ytvatten transporterades ned i beräknad takt /12-25/.

I förvaret finns vid förslutning stora mängder syre. Detta syre förbrukas på olika sätt via reaktioner med berg, återfyllnadsmaterial och bentonitlera. Det finns också en hypotetisk möjlighet att syret angriper kopparkapseln och åstadkommer korrosion under en begränsad tid. För att analysera denna potentiella risk är det angeläget att känna reaktionskinetiken för reduktion av syre i berget och i bentoniten.

REX – redox experiment i detaljskala – avser att klargöra och demonstrera hur syre förbrukas i kontakt med berg. Tills vidare är detta ett av SKB initierat projekt där andra i Äspölaboratoriet deltagande organisationer har visat intresse och troligen kommer att delta aktivt.

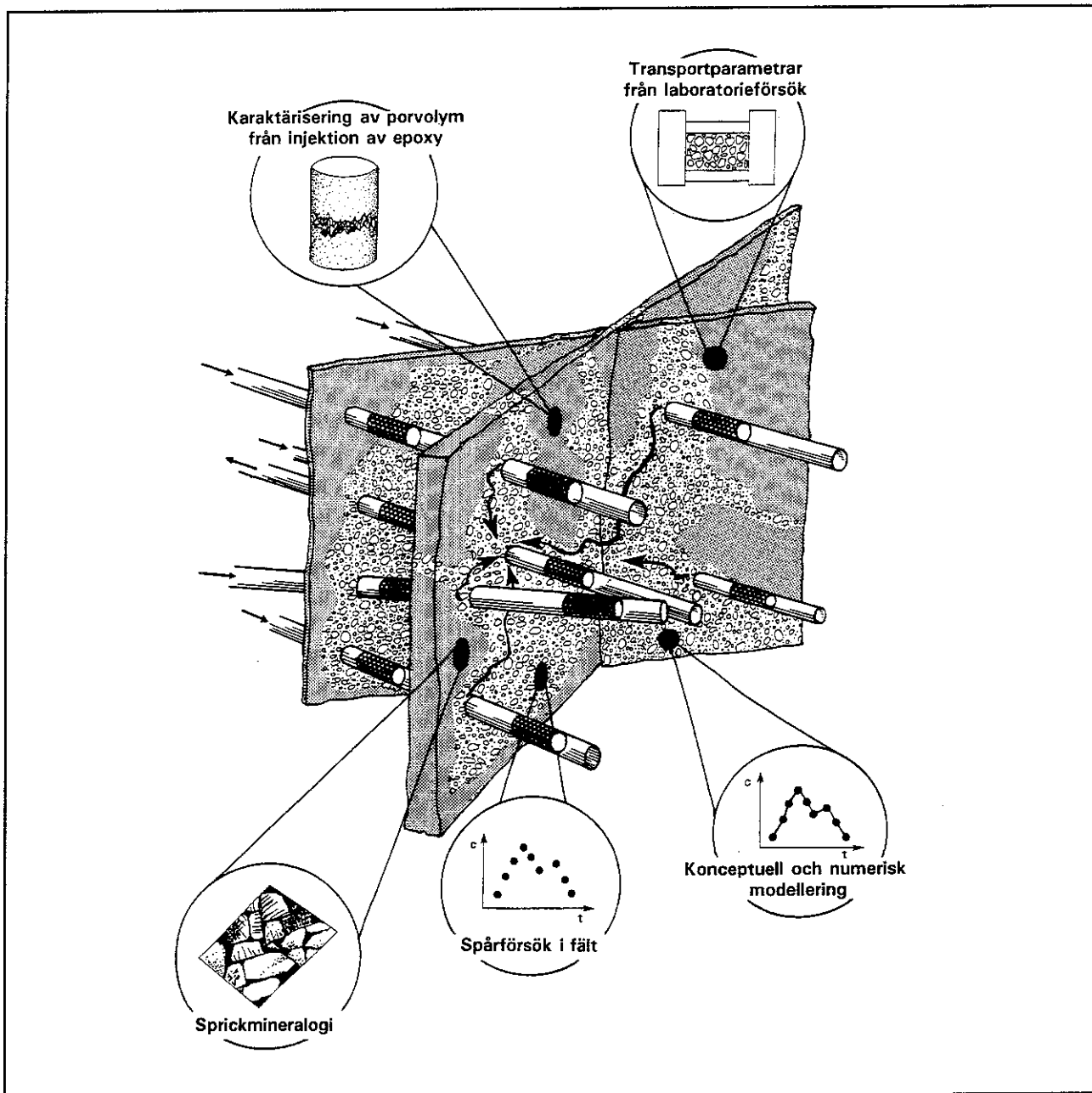
Mål

Mål för REX-projektet är

- att definiera en halveringstid för syre i kontakt med berg,
- att fördjupa kunskapen om de mekanismer som ger upphov till reduktion av syre,
- att kvantifiera reaktionshastigheten för reduktion av syre i kontakt med berg, speciellt reaktioner med bergmineral i vattenförande sprickor.

Utförande

Arbetet inleds med laborieförsök där syresatt vatten får reagera med bergmaterial. Både statiska försök och kolonnexperiment kommer att genomföras. Resultaten från laborieförsöken kommer att vara dimensionerande för de fältförsök som kommer att genomföras i Äspölaboratoriet. Innan arbetet i fält inleds kommer den experimentella uppställningen för fältförsöket att utprovas i laboriet.



Figur 12-4. Principskiss för TRUE-försöket.

12.5.5 Radionuklidretention

Bakgrund

De flesta radionuklider har en stark affinitet för att fastna på olika ytor, d v s ett högt K_d värde. Via laboriemätningar har man kommit fram till siffrvärden som kan användas i säkerhetsanalyserna. Det är emellertid svårt att i laboriet efterlikna de naturliga grundvattenförhållandena i berget, t ex vad avser redoxstatus, halter av kolloider, lösta gaser och organiskt material. Det är följaktligen svårt att få fram säkra värden från laboriet på t ex upplösning eller retention av radionuklider i de fall där de är starkt beroende av grundvattnets egenskaper.

Mål

Målen för undersökningarna är att

- validera modeller och kontrollera konstanter som används för att beskriva radionuklidens upplösning i grundvatten, inverkan av radiolys, bränslekorrosion, sorption på mineralytor, 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.

Utförande

Med hjälp av en borrhålssond som konstruerats för att användas för olika slag av retentionsmätningar kan man erhålla data på de in situ egenskaper som grundvattnet har i berget. CHEMLAB sonden tillverkas för närvarande och kommer att tas i bruk under 1996. Principerna för sondens konstruktion visas i Figur 12-5. Olika typer av mätningar beräknas pågå mer än 5 år framöver. Innan in-situ försöken genomförs i CHEMLAB sonden kommer försöksupställningarna att testas i ett normalt laboratorium. Detaljprogram för de experiment som skall genomföras kommer att utarbetas successivt med början under slutet av 1995.

Experiment planerade för CHEMLAB-sonden omfattar radionuklid diffusion i bentonit och i betong, migration av redoxkänsliga nuklider, löslighet, desorption, migration från buffert till berg (sk filmmotstånd), radiolys och upplösning av använt bränsle.

Diffusion i bentonit och betong planeras för ^{85}Sr , ^{134}Cs , ^{125}I i samma körning och ^{99}Tc i ett eget experiment. Standard Portland cement och bentonit MX 80 kommer att användas i diffusionscellerna. Detta experiment beräknas ta nio månader att genomföra.

Migration av redoxkänsliga nuklider. Tc(VII) och U(VI) planeras genomföras i en naturlig utborrad spricka. Experimentet kombinerat med bestämning av lösligheter för Tc(IV) och U(IV) beräknas ta tio månader.

Desorption av radionuklider, Tc, Sr och Cs, planeras för bestämning av reversibiliteten då nukliderna sorberats på bergsytor. Experimentet beräknas ta drygt ett halvt år att genomföra.

Det s k filmmotståndet, transporten av nuklider från bentonitbarriären ut till en vattenförande spricka, planeras med Sr, Cs och I som nuklider. Experimentet beräknas pågå i fem månader.

Radiolysexperiment planeras med Tc och beräknas pågå mer än ett år.

Experiment med använt bränsle kommer att kräva omsorgsfull radiologisk kontroll på både genomförande och tillhörande transporter. Den exakta tidsåtgången kan inte beräknas förrän dessa frågor har utretts. Det är rimligt att anta en experimenttid av 3-5 år.

Ordningföljden för dessa experiment har inte bestämts.

12.5.6 Hydrokemimodellering

Bakgrund

Att kombinera kemimodeller med hydrologimodeller är en uppgift som kan genomföras på olika sätt. Pågående internationella arbeten inom ramen för Äspö Geochemical Modelling Project, syftar till att kontrollera konsis-

tensen hos hydrogeologiska grundvattenflödesmodeller och hydrogeokemiska blandningsmodeller. Dessutom ingår att klarlägga de kemiska processer som är av betydelse för paleohydrogeologiska utvärderingar och förutsägelser om framtida grundvattenförhållanden.

De starkaste skälet att göra de paleohydrogeologiska modelleringarna på Äspödata är att grundvattnet uppvisar en sådan tydlig skillnad i salthalt och isotopmönster. Anledningen är att Äspö sedan senaste istid, för ca 12000 år sedan, legat under havet ända tills för ca 3000 år sedan. Under hela den tiden har inga topografiskt betingade grundvattenflöden förändrat kemin utan bevarat de förhållanden som inträtt i samband med isavsmältningen. Den enda påtagliga effekten är att salt vatten sjunkit ner i de konduktiva zonerna.

Mål

Det övergripande målet är att öka förståelsen för de förändringar i rådande grundvattensystem som kan tänkas ske i framtiden samt att utveckla metodik för integrerad hydrokemisk modellering.

Utförande

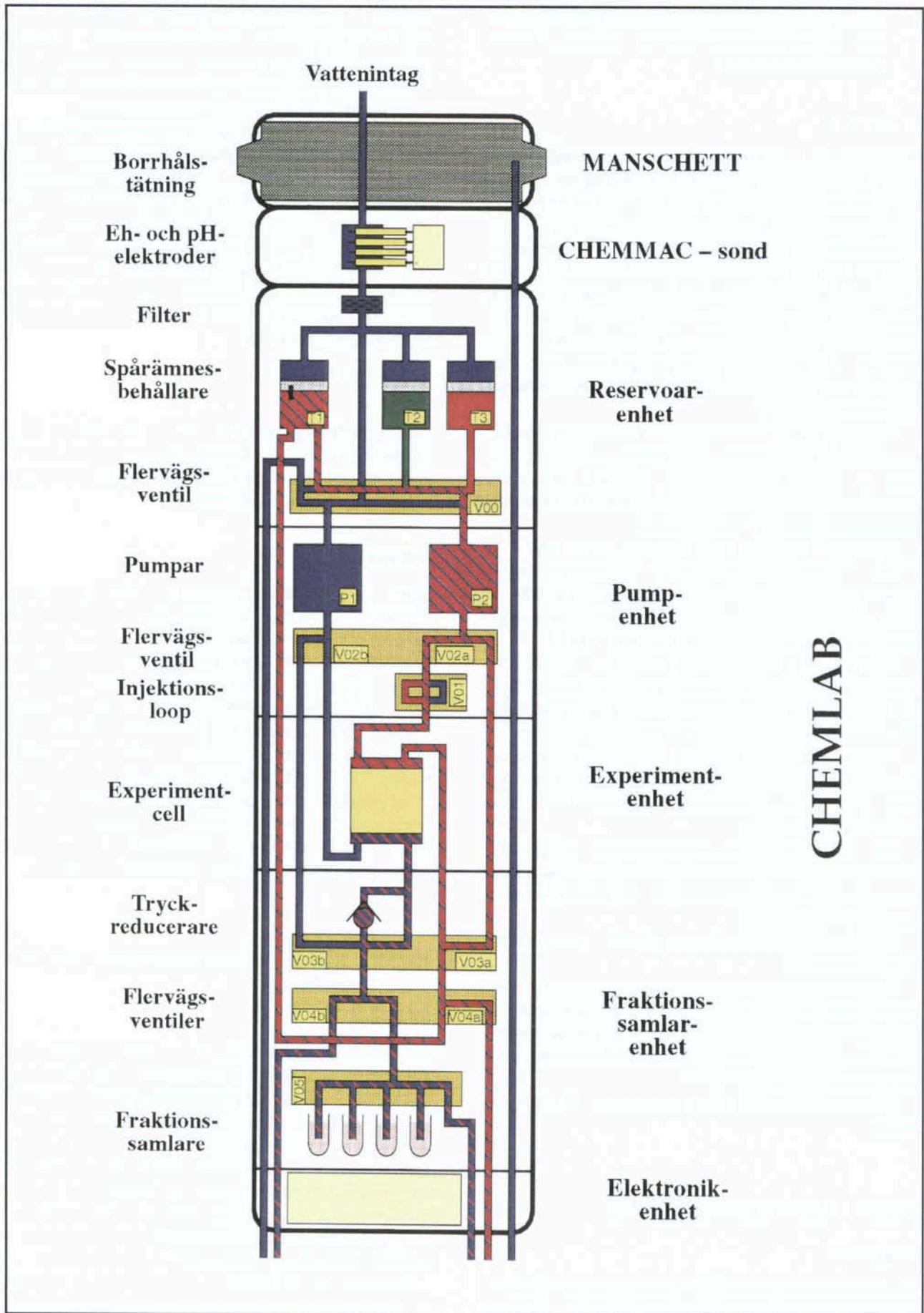
Modelleringsarbetet genomförs av modellgrupper som arbetar för de organisationer som deltar i Äspöprojektet. Arbetet utförs på undersökningsdata som i huvudsak insamlats under förundersökningsfasen. Avrapporteringen har gjorts vid arbetsmöten i juni 1994 /12-26/ och 1995. Arbetet mellan 1994 och 1995 har utförts i enlighet med två planer publicerade tillsammans med ett paleohydrogeologiskt program i SKBs ramverk för regionala studier /12-27/. Ett förslag till avslutande modellövning är att genomföra funktionsanalys för ett tänkt förvar på Äspö med fokus på stabiliteten i de kemiska förhållandena och de geokemiska förhållandena som påverkar transport av främst de svagt sorberande nukliderna.

12.5.7 Avgasning av grundvatten och två-fasflöde

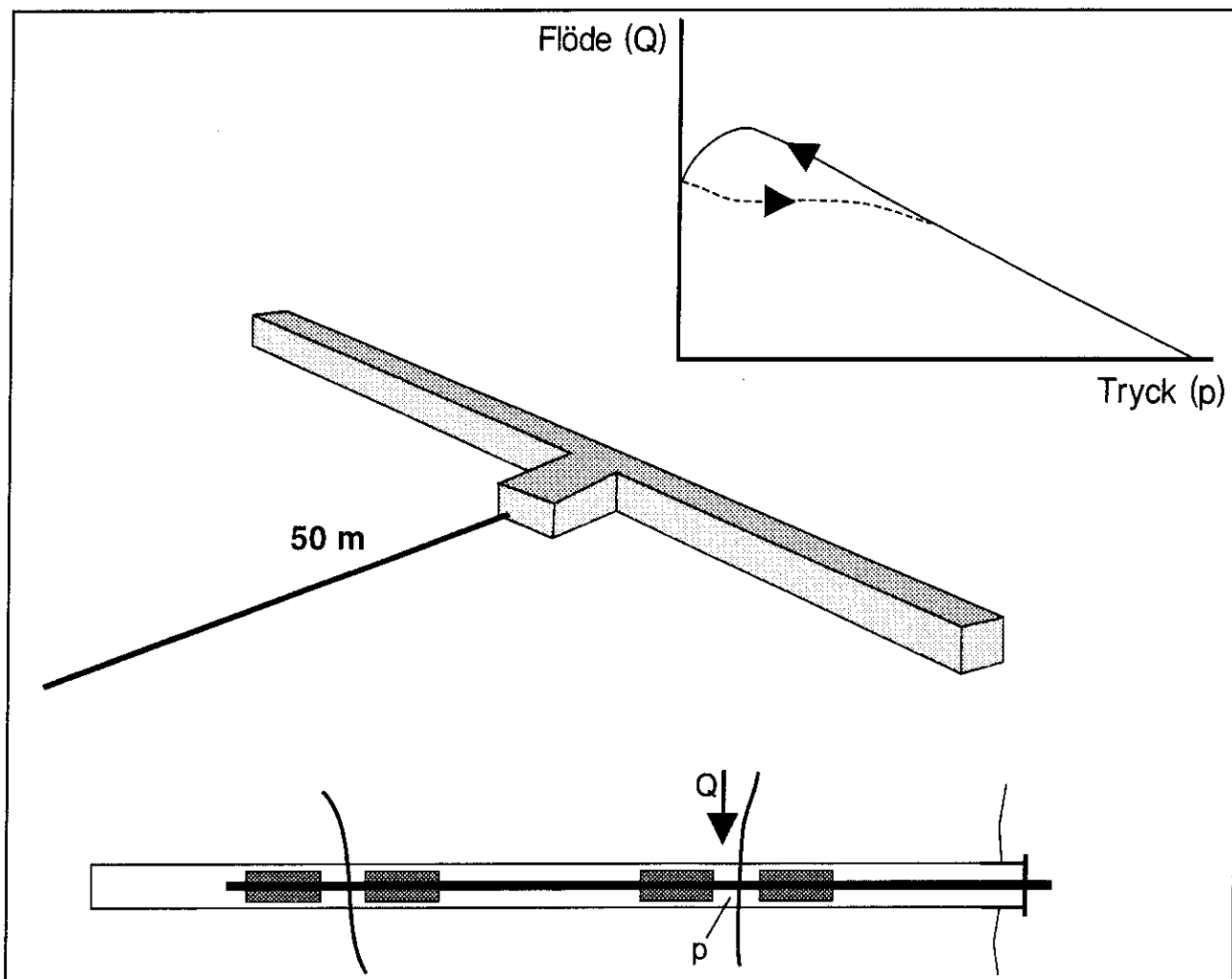
Bakgrund

Omättat eller två-fas flöde, d v s samtidigt flöde av gas och vatten, kan uppstå i ett djupförvar på grund av 1) frigörelse av i grundvattnet naturligt förekommande lösta gaser vid de låga tryck som uppkommer i närheten av dränerade tunnlar, 2) penetration av gas (luft) in i berget från ventilerade tunnlar eller från buffer och återfyllnadsmaterial 3) penetration av gas producerad på grund av korrosion eller biologiska processer samt 4) radioaktiva gaser som bildas vid radioaktivt sönderfall av det använda bränslet (se även avsnitt 5.4.5 och 5.5.6).

Kunskap om två-fasflöde i sprickigt berg är väsentligt för att förstå de observationer av hydrauliska egenskaper som görs från tunnlar, tolkning av experiment som genomförts i närheten av orter samt funktionen hos buffert-



Figur 12-5. Schematisk bild över CHEMLAB-sondens konstruktion.



Figur 12-6. Princip för studie av inverkan av avgasning av grundvatten i borrhål. Diagrammet indikerar förväntat resultat om hypotesen är korrekt.

och backfill-materialet, speciellt i samband med återfyllnad och förslutning av djupförvaret.

Mål

Syftet med undersökningarna av två-fasflöde i berget och betydelsen av avgasning av grundvattnet är:

- Att visa i vilken utsträckning avgasning av grundvatten vid låga tryck påverkar mätningar av hydrauliska egenskaper i tunnlar och borrhål belägna under jord.
- Att studera och kvantifiera andra processer som ger upphov till tvåfasflöde nära tunnlar eller bergrum såsom inströmning av luft i berget och avdunstning.
- Att visa på de förhållanden som gör att tvåfasflöde uppstår och bestämmer hur betydelsefullt det är, t ex gasinnehåll i grundvattnet och sprickornas egenskaper.

- Att få ett mått på den tid som erfordras för att djupförvaret skall bli vattenmättat igen efter förslutning.
- Att utveckla utrustning för mätning av vattenmättnad in-situ.

Utförande

Förändringar i de hydrauliska egenskaperna på grund av avgasning kommer att observeras genom att mäta inflödet till ett borrhål vid olika tryck. Avgasning och därav orsakat två-fasflöde kommer att visa sig som olinjäriteter i det mätta sambandet mellan tryck och flöde från borrhålet, se Figur 12-6. Därefter kommer gas att injiceras i borrhålet för att simulera gastransport från avfall som genererar gas vid korrosion. Försöken i Äspölaboratoriet kompletteras med relativt omfattande laboratorieförsök. En detaljerad Test Plan för projektet har utarbetats /12-28/.

Resultat av ett inledande pilotförsök är rapporterat /12-29/.

12.6 DEMONSTRERA TEKNIK FÖR OCH FUNKTION HOS VIKTIGA DELAR I FÖRVARSSYSTEMET, PROGRAM FÖR 1996-2001

12.6.1 Allmänt

Äspölaboratoriet ger möjlighet att i full skala pröva, undersöka och demonstrera olika komponenter i djupförvarssystemet som har betydelse för långtidssäkerheten. Det är också viktigt att visa att hög kvalitet kan erhållas i utformning, byggande och drift av ett djupförvar. Inom ramen för etappmålet kommer en fullskaleprototyp av djupförvaret att byggas för att simulera samtliga steg i deponeringssekvensen. Som en förberedelse prövas olika återfyllnadsmaterial och teknik för återfyllnad av tunnlar. Dessutom genomförs detaljerade undersökningar av samverkan mellan de tekniska barriärerna och berget, i vissa fall under långa tider.

12.6.2 Provning av olika återfyllnadsmaterial

Bakgrund

Under 1994 utarbetades ett program för byggande av ett prototypförvar på Äspö. Programmet har publicerats som en Progress Report /12-30/ i Äspölaboratoriets rapportserie. Programmet innehåller tre huvuddelar:

- provning av olika material för tunnelåterfyllnad,
- byggande av ett prototypförvar i slutet av TBM-tunneln samt
- provning av buffertmaterial under olika extrema förhållanden.

De tre huvuddelarna i programmet kommer att bedrivas i form av separata projekt.

Material för tunnelåterfyllning har i PLAN-arbetet och säkerhetsanalyser förutsatts bestå av en blandning av kvartssand ("Bornholmssand") och bentonit som läggs ut i lager och kompakteras med vibrerande utrustning. Överst mot taket blåses blandningen bara in, vilket dock ger en lägre täthet i den delen av återfyllnaden. Möjligheten att ersätta kvartssand med krossberg från tillredningsprocessen har analyserats /12-31/. Slutsatsen är att erforderliga funktionskrav (se avsnitt 5.4) även kan uppfyllas med tillredningsberg som ballastmaterial. I en annan studie /12-32/ dras slutsatsen att ett återfyllnadsmaterial bestående av enbart sand eller bergkross utan bentonit uppfyller kraven på säkerhet mot radionuklidmigration om tunneln ej korsar större sprickzoner och

vattenflödet genom tunneln är litet. Prov kommer att göras med olika återfyllnadsmaterial för att i fullskaliga bekräfta modellerna för återfyllnadsmaterialets hydrauliska och mekaniska egenskaper i ett djupförvar. I samband med provning av olika återfyllnadsmaterial utvecklas och provas även teknik för packning och återtag (utgrävning) av återfyllnadsmaterial i tunnlar.

I det planerade djupförvaret kommer deponering att ske successivt. Då deponering skett längs en tunnel och den återfyllts måste tunneln förseglas med en temporär plugg. Försöken med olika återfyllnadsmaterial kommer även att innefatta utveckling och provning av teknik för placering, konstruktion samt funktion av en tunnelplugg.

Mål

Syftet med återfyllnads- och pluggförsöket (Back Fill and Plug Test) är att:

- prova olika tunnelfyllnadsmaterial,
- utveckla och prova teknik för återfyllnad av tunnlar, speciellt i den övre delen av tunnlar,
- utveckla och prova teknik för återtagande av tunnelåterfyllnad,
- prova återfyllnadens och närbergets samverkan i en sprängd tunnel,
- ta fram underlag för val av återfyllnadsmaterial i det så kallade prototypförvarsförsöket,
- utveckla och prova teknik för placering och konstruktion av tunnelpluggar,
- prova den mekaniska och hydrauliska funktionen hos en typ av tunnelplugg,
- öka kunskapen om den störda zonens hydrauliska egenskaper.

Utförande

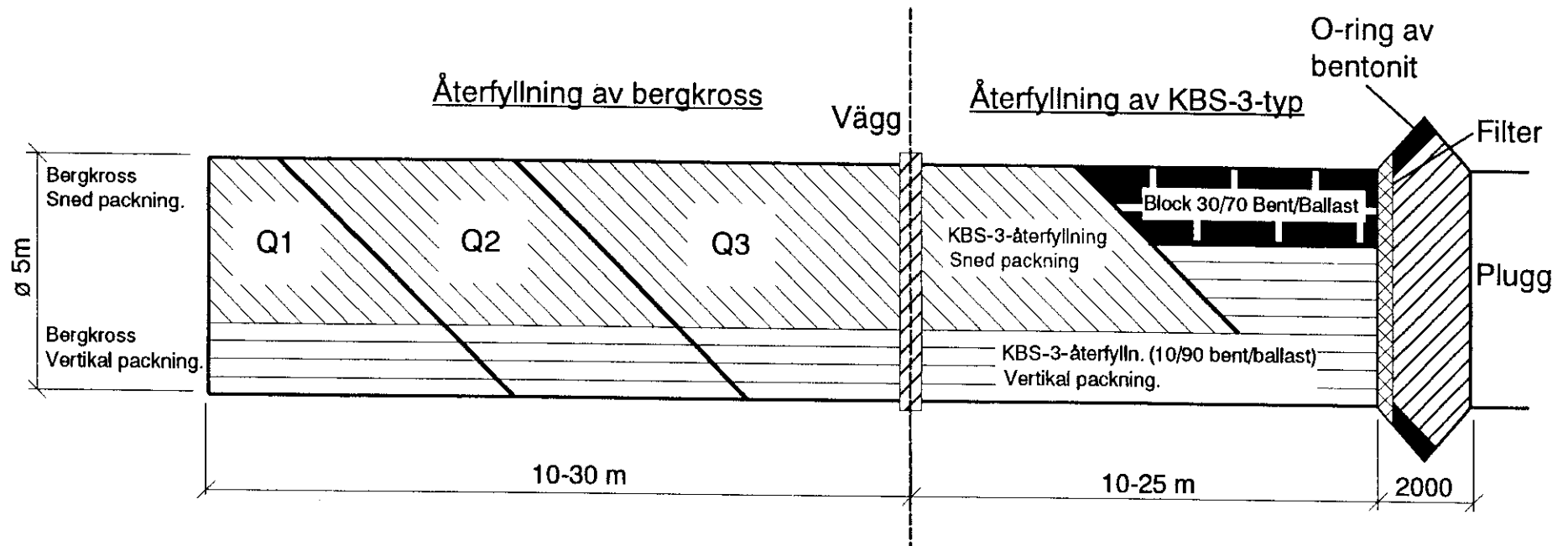
Försöket är tänkt att genomföras i den sprängda ZEDEX-tunneln som kommer att fyllas med olika typer av kompakterat återfyllnadsmaterial. Inre delen kommer att fyllas med TBM-massor utan tillsats av bentonit. Både befintliga TBM-massor och TBM-massor krossade till lämplig kornstorlek kommer att användas. Yttre delen av orten kommer att återfyllas med TBM-massor som blandats med bentonit. Olika teknik kommer att användas för att kompaktera återfyllnadsmaterialet i tunnelns övre och nedre delar. En plugg kommer att byggas vid tunnelöppningen för att innesluta återfyllnadsmaterialet, se Figur 12-7.

Återfyllnadsmaterialet och närberget kommer att instrumenteras med sensorer för mätning av vattentryck, totaltryck, rörelser och vattenmättnad. Den axiella hydrauliska konduktiviteten hos återfyllnadsmaterialet och närberget samt återfyllnadens mekaniska egenskaper kommer att mätas. Pluggens hydrauliska funktion kommer att provas.

Fullskaleförsöken med buffert- och återfyllnadsmaterial behöver förberedas med olika prov och teknikutvecklingar. Under 1995 inleddes följande arbeten:

ÄSPÖLABORATORIET – ÅTERFYLLNINGSFÖRSÖK

Översikt



**Naturvetenskapliga
processer**

Hydromekanik
Samverkan återfyllning/berg
Störd zon

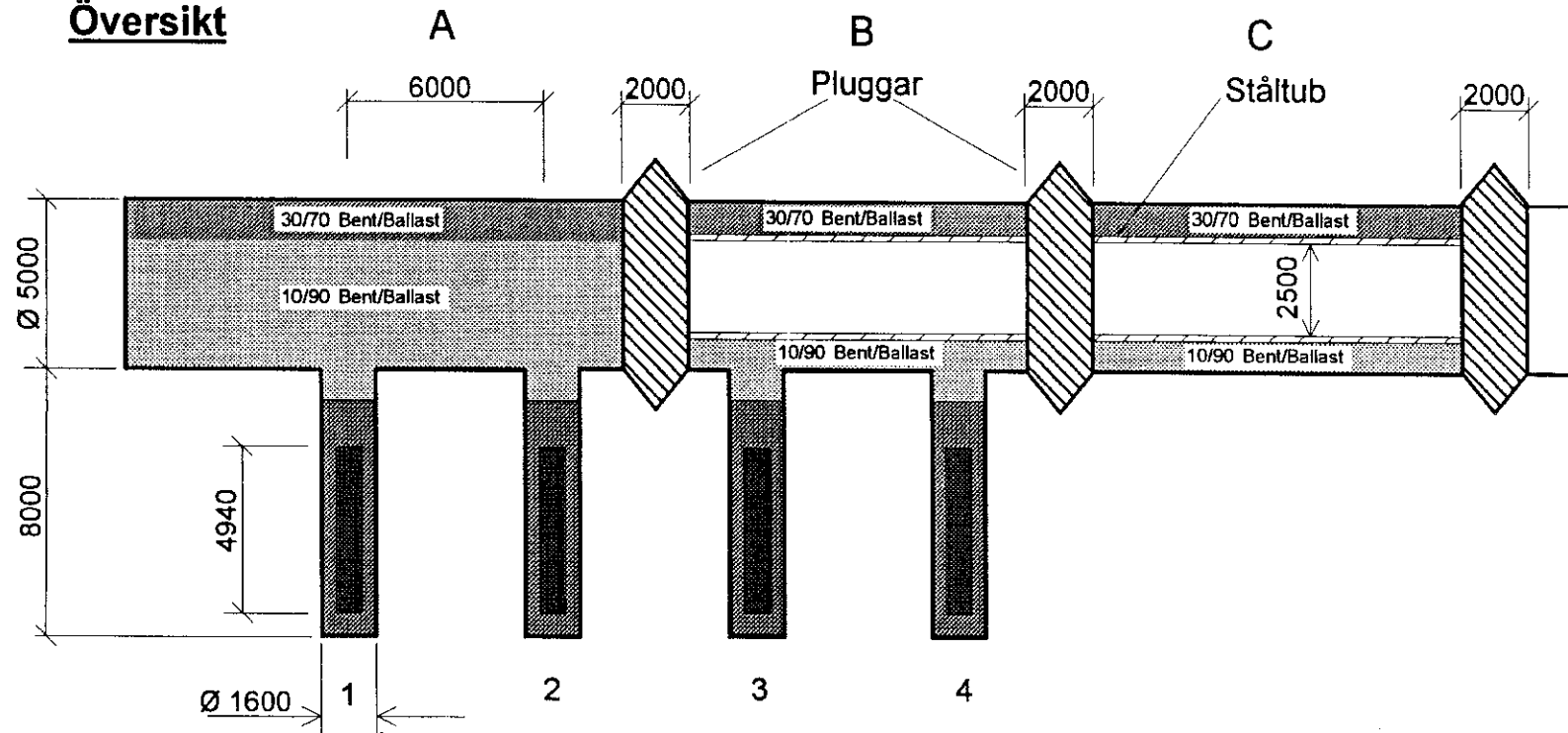
**Ingenjörsvetenskapliga
processer**

Inplacering av återfyllning
Kompaktering av återfyllning
Kvalitetskontroll

Figur 12-7. Översikt av försökskonfigurationen för återfyllnads- och pluggförsöket och de processer som skall studeras.

ÄSPÖLABORATORIET – TEST AV PROTOTYPFÖRVAR

Översikt



$T=80^{\circ}\text{C}$	$T=80^{\circ}\text{C}$	$T=80^{\circ}\text{C}$	$T=80^{\circ}\text{C}$
$\rho_m=2.0 \text{ t/m}^3$	$\rho_m=2.0 \text{ t/m}^3$	$\rho_m=2.0 \text{ t/m}^3$	$\rho_m=2.0 \text{ t/m}^3$
$Sr_i=90\%$	$Sr_i=40\%$	$Sr_i=40\%$	$Sr_i=90\%$

Teckenförklaring:

ρ_m = densitet vid vattenmättnad

Sr_i = ursprunglig vattenmättnadsgrad

Figur 12-8. Preliminär utformning av Äspö prototypförvar.

- 1 Utveckling och provning av teknik för att inplacera, packa och gräva ut återfyllningsmaterial i tunnlar.
- 2 Laboratorieprov av återfyllningsmaterialens kompakteringsegenskaper och de hydrauliska och mekaniska egenskaperna efter kompaktering.
- 3 Utveckling och provning av fältmätningssinstrument och provtagningsteknik för buffert och återfyllningsmaterial.

Detaljer om de inledande försöken finns beskrivna i en Test Plan /12-33/.

12.6.3 Prototypförvar

Bakgrund

Inför byggandet av ett djupförvar är det viktigt att få pröva så många av systemets komponenter som möjligt i full skala innan deponering av använt bränsle sker. I detta sammanhang är det av särskild vikt att pröva samverkan mellan ingenjörskategorierna och berget i en realistisk miljö. Detta avses bli prövat i ett prototypförvar som förläggs till slutet på den TBM-borrade tunneln i Äspölaboratoriet.

Utformning, byggande och prov med prototypförvaret på Äspö syftar till att simulera samtliga steg i deponeringssekvensen från detaljerad karakterisering av omgivande berg till att vattenmättnad erhållits i de återfyllda deponeringshålerna och tunneln. Prototypförvaret kommer inte att simulera hantering och deponering av använt bränsle. Istället kommer kopparkapslar med elektriska värmare att användas. En mer detaljerad beskrivning finns i /12-30/.

Mål

Projektets mål är:

- att överföra vetenskaplig kunskap och bästa tillgängliga (state-of-the-art) teknologi till praktiskt tillämpat ingenjörskunnande som kan användas i ett verkligt djupförvar.
- att pröva och demonstrera integrationen av olika steg i deponeringssekvensen i en realistisk miljö.
- att visa att deponeringssekvensen kan utföras med tillfredställande kvalitet i förhållande till relevanta kriterier.
- att utveckla och pröva ändamålsenliga kriterier och kvalitetssystem.
- att pröva och demonstrera den integrerade funktionen hos prototypförvaret.
- att demonstrera metoder för design, byggande, borrning av deponeringshål, karakterisering av närområdet, återfyllnad, pluggning, övervakning och återtagbarhet.

Trots en relativt lång projekttid (10-15 år) kan prototypförvaret inte användas för att demonstrera den långsiktiga säkerheten hos ett djupförvar.

Utförande

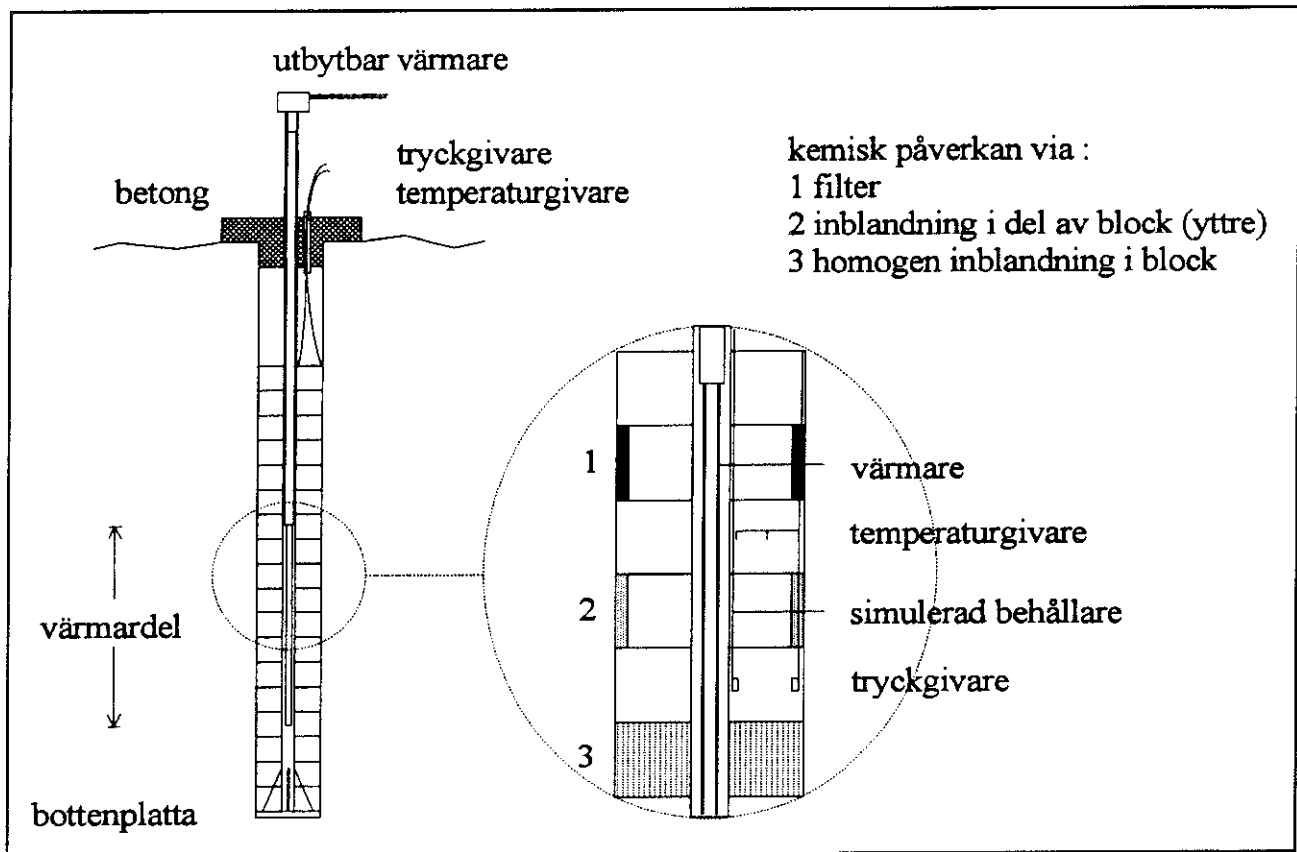
Den grundläggande idén för projektet är att utforma, bygga och pröva funktionen hos ett prototypförvar på Äspö. Detta blir en generalrepetition inför byggandet av djupförvaret. Projektet skall omfatta karakterisering av berget i närområdet, design av förvarskomponenter, borrning av deponeringshål, deponering av kapseltrappor med elektriska värmare, förslutning, vattenmättnad av bentonit i deponeringshålerna och återfyllnadsmaterialet i tunneln samt utgrävning och återtag av kapseltrapporna. Projektet kommer att innefatta funktions- och säkerhetsanalyser i anslutning till olika skeden i deponeringssekvensen.

Prototypförvaret kommer att byggas i inre delen av den TBM-borrade tunneln på 450 m djup i Äspölaboratoriet. Preliminärt planeras för 4 deponeringshål i full skala med ett avstånd mellan hålen av ca 6 m, vilket är detsamma som planeras enligt KBS-3 konceptet. Den föreslagna konfigurationen visas i Figur 12-8. TBM-tunneln ovanför de två inre deponeringshålerna kommer att återfyllas helt. Resultaten från försöket med olika återfyllnadsmaterial kommer att användas som underlag för val av återfyllnadsmaterial i detta försök. En tunnelplugg kommer att skilja denna del från den yttre delen av försökstunneln i vilken en ståltub med en inre diameter av 2,5 m kommer att monteras. Ståltuben kommer att hållas på plats av de tre tunnelpluggarna som visas i Figur 12-8. Tuben och pluggarna kommer att konstrueras för att tåla kombinationen av fullt vattentryck och svälltryck från buffert och återfyllnadsmaterial. Ståltuben motiveras av att den ger utrymme för kablage och instrumentering, möjliggör provtagning av buffert och återfyllnadsmaterial, möjliggör mätningar av deformationer i närheten av deponeringshålerna samt reducerar mängden återfyllnadsmaterial och den tid som erfordras för att nå vattenmättnad.

12.6.4 Långtidsprov av buffertmaterialets funktion

Bakgrund

Buffertmaterialets funktion har tidigare provats i Stripa under en tidsrymd av upp till 5 år /12-34/. Dessa försök gjordes i vatten med låga salthalter, under relativt låga vattentryck och måttliga temperaturer (ca 80°C). Ett av resultaten var att man fann en förväntat förhöjd kloridhalt i den inre delen av bufferten närmast värmaren. (Ökningen i kloridhalt var dock för liten och oregelbunden för att entydigt kunna tolkas som ett anrikningsfeno-



Figur 12-9. Preliminär utformning av försök för långtidstest av buffertmaterialens funktion.

men.) Ett försök med fransk lera genomfördes vid en temperatur av ca 170°C, vilket resulterade i en allvarlig försämring av bentonitens buffertegenskaper närmast värmaren till följd av en kombination av saltanrikning, upplösning av kvarts i bentonitmaterial och cementering (bildning av "lersten"). Olika tänkbara mineralogiska och kemiska processer har studerats i laborieförsök. Resultaten visar att de negativa effekterna på buffertfunktionen är försumbara om bufferten utformas med den täthet (ca 2,0 g/cm³ efter vattenmättnad) som är tänkt i KBS-3, där bentonitblock förkompakteras med hög vattenmättnadsgrad och temperaturen hålls på måttlig nivå (under 100°C). Kunskapsläget redovisas i avsnitt 5.4. Det är väsentligt att verifiera laborieresultaten och framtagna modeller under realistiska djupförvarförhållanden under långa tidsrymder, eventuellt upp till 20 år.

Mål

Att prova bentonitbuffertens funktion i djupförvarsmiljö under lång tid (möjligen upp till 20 år).

Att prova modeller och bekräfta resultat från laborieexperiment rörande omvandling av smektit till illit, saltanrikning och inverkan av högt pH.

Att utesluta förekomsten av icke identifierade men möjliga processer i djupförvarsmiljö.

Utförande

Långtidförsöken med bentonitens funktion är tänkt att genomföras i 4-7 m djupa borrhål med en diameter av ca 300 mm. I hålen nedsänks kompakterade bentonitblock med en värmare i mitten, se Figur 12-9. Hålen instrumenteras för mätning av temperatur, tryck och värmeledningsförmåga (vattenhalt) under försökets löptid. För provning av bufferten under förhållanden representativa för referenskonceptet drivs temperaturen till en maximal nivå av ca 100°C och hålen fylls med MX-80 bentonit med hög vattenmättnadsgrad. För provning under avvikande förhållanden kombineras försök med saltanrikning, cementering och mineralomvandling i samma hål. Eftersom dessa processer är temperaturberoende genomförs försöken vid högre temperatur än 100°C. Prov med enbart hög temperatur genomförs för sig.

I ett första skede instrumenteras ett hål enligt referenskonceptet och mätningar av buffertens funktion i det hålet mäts under 1 år. Därefter tas bufferten upp genom överborrning av testhålet. Prover tas och skickas till laboriet för att kvantifiera intressanta parametrar, t ex vattenmättnad, kemisk sammansättning hos buffer och porvatten, mineralsammansättning, svälltryck, hydraulisk konduktivitet och sjuvhållfasthet. Detta hål utnyttjas som ett pilotförsök för test av instrumentering och experimentkoncept innan långtidförsöken inleds.

Långtidsförsöken beräknas ske i totalt 6 hål där försöken successivt kommer att brytas efter 3, 5, 10 och maximalt 20 år. När försöket i respektive hål bryts tas bufferten upp genom överborrning och bufferten provtas på ett liknande sätt som gjorts för pilothålet.

12.6.5 Sprickbildning vid tunneldrivning med TBM

Bakgrund

Mekanisk brytning, t ex TBM-borrning, ger mycket mindre skador på bergväggen än sprängning. Detta beror på att mekanisk brytning bildar sprickor med liten inträngning i bergväggen jämfört med sprängning. Laboratorieprov har visat att sprickornas utbredning och form systematiskt kan relateras till bergets egenskaper och maskinparametrarna. Uppsprickningen i tunnelväggen eller i deponeringshålens väggar har betydelse för de hydrauliska egenskaperna i kapselns närområde.

Mål

Att utveckla en modell för sprickbildning i kristallint berg vid mekanisk brytning för att kunna beskriva egenskaperna hos berget närmast öppningen.

Utförande

Baserat på resultat från tidigare laborieförsök med "indenters" har en konceptuell modell för sprickbildning vid mekanisk brytning presenterats. Denna modell kommer att förfinas ytterligare med utgångspunkt från verifierande studier med laborieuppställningar samt studier av prover från den TBM-borrade delen av Äspötunneln. Representativa borrkärneprover kommer att väljas ut för detaljerade studier av mikrospricksystemet skapat av TBM-maskinens stålskär och "grippers".

12.6.6 Lokalisering av lämpliga närområden

Bakgrund

Lämplig bergmiljö för deponering av kapslar är att närområdet är mekaniskt stabilt, att den kemiska miljön är reducerande, samt att vattenomsättningen är låg.

Platsundersökningar för ett förvar syftar bl a till att bestämma lämplig plats för ett förvarsområde. I de därpå följande detaljerade undersökningarna ska det bekräftas att det finns en förvarsvoly m tillgänglig. I samband med utbyggnaden av förvaret kan kapselpositioner successivt accepteras eller förkastas. Metodik för detta prövas vid Äspölaboratoriet och förväntas ge ett underlag för planering, utformning och byggande av ett djupförvar.

Mål

Att utveckla en statistisk metodik för att uppskatta den del av deponeringstunnlarnas längd som kan användas för utplacering av kapslar baserat på geologisk, bergmekanisk, hydrogeologisk och annan information från olika undersökningsskeden.

Utförande

Det första skedet omfattade att för en given bergvolym på Äspö uppskatta antalet lämpliga kapselpositioner i denna bergvolym som uppfyller krav på mekanisk stabilitet, kemiskt reducerande miljö och låg vattenomsättning. Beräkningar har utförts med en Markov-Bayesansk geostatistisk modell som utvecklats av SKB /12-35/.

Beräkningarna i det första skedet var baserade på data från undersökningar på markytan och i borrhål från markytan. I nästa skede kommer data från detaljundersökningarna under jord att inkorporeras i beräkningarna och vidareutveckling av beräkningsmetodiken att göras.

12.6.7 Test av injekteringsmetodik

Bakgrund

Programmet för utveckling av injekteringsteknik presenteras i avsnitt 9.6 och syftar till en ökad kunskap om processer och faktorer som påverkar åtgången av injekteringsmaterial och erhållet injekteringsresultat, samt utveckling av praktisk teknik för att bemästra förhållanden som kan uppstå i djupförvaret och som inte kan lösas på ett säkert sätt med dagens kommersiella metoder. Kunskande och teknik behöver verifieras genom försök under realistiska förhållanden.

Mål

Att verifiera kunnande och teknik om injektering/förstärkning av större transmissiva diskontinuiteter och starkt vattenförande diskontinuiteter med måttlig maktighet och utbredning.

Utförande

För karakterisering av berg ur injekteringssynpunkt planeras utveckling av en för ändamålet anpassad hydraultestmetod. Utrustning provas i Äspölaboratoriet under väl kontrollerade former, och studie av noggrannheten i karakteriseringen sker genom injektering i borrhål.

Förinjekteringens stabiliserande och tätande verkan studeras genom undersökning av lämpliga avsnitt i Äspötunneln där enbart förinjektering genomförts.

Fältförsök avseende spridningsmekanismer i sprickigt berg med varierande spricköppning aktualiseras så småningom, men först när teoretiskt underlag finns framme

Namn	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	
Fastställande av detaljundersökningsmetodik										
ZEDEX										
Rock Visualization System										
Hydrotestutrustning för underjordsmätning										
Test och vidareutveckling av undersökningsmetodik										
Test av modeller för bergets barriärfunktion										
Klassificering och karakterisering av sprickor										
Tracer Retention Understanding Experiments										
REX Redoxförsök i detaljskala										
Radionuklidretention										
Hydrokemimodellering										
Avgasning av grundvatten och två-fasflöde										
Demonstration av teknik och funktion										
Test av återfyllnadsmaterial och pluggar										
Prototypförvar										
Långtidstest av buffertmaterial										
Sprickor vid tunneldrivning med TBM										
Lokalisering av lämpliga närområden										
Test av injekteringsmetodik										

Figur 12-10. Tidplan för genomförande av försöken vid Äspölaboratoriet.

i form av konceptuella modeller för prediktering av injekteringsresultatet.

12.7 TIDPLAN FÖR GENOMFÖRANDE AV FÖRSÖKEN

En tidplan för genomförande av försöken framgår av Figur 12-10.

12.8 INTERNATIONELLT DELTAGANDE

Verksamheten vid Äspölaboratoriet har rönt stort internationellt intresse. Avtal om deltagande finns med Atomic Energy of Canada Limited (AECL); Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corporation (PNC), Japan; Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI), Japan; Agence National Pur la Gestion des Dechets Radioactifs (ANDRA), Frankrike; Teollisuuden Voima Oy (TVO), Finland; UK Nirex, Storbritannien; United States Department of Energy (USDOE), USA; Nationale Genossenschaft für die Lagerung von Radioaktiver Abfälle (Nagra), Schweiz; och Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF), Tyskland. Avtalen med PNC och CRIEPI är förnyade för en andra 4-årsperiod.

Det praktiska samarbetet sker genom att organisationerna har personal på platsen och deltar i genomförandet av olika experiment. Fler av de deltagande organisationerna har planerat ytterligare undersökningar och experiment som specificerats i de avtal som träffats med respektive organisation. Dessa experiment genomförs utöver det program som här redovisas och ger ett betydande mervärde till SKBs verksamhet.

Det vetenskapliga samordningen sker bland annat genom en International Joint Committee (IJC, se nedan) och Technical Evaluation Forum (TEF). En betydande del av samarbetet rör modeller för grundvattenströmning och radionuklidtransport. En arbetsgrupp, s k Task Force, med medlemmar från de deltagande organisationerna, jämför och utvärderar regelbundet resultat från olika försök med hjälp av olika beräkningsmodeller. Det

internationella deltagandet ger möjlighet att pröva olika angreppssätt för hur t ex grundvattenströmning och radionuklidtransport i berg skall beskrivas. Resultat från det internationella samarbetet redovisas i en separat rapportserie, Äspö International Cooperation Reports.

12.9 GENOMFÖRANDE, ORGANISATION, INFORMATION

Insatserna vid Äspölaboratoriet genomförs liksom SKBs övriga FoU-arbeten genom uppdrag till universitet, högskolor, forskningsinstitutioner, konsulter, industrier och andra svenska och utländska forskare. Härigenom ges möjlighet till att hålla genomgående en hög kompetens och kvalitet. För olika undersökningar och experiment har man möjlighet att välja den mest lämpade kvalificerade experten. För vissa frågor kan man pröva olika alternativa vägar eller modeller.

Inriktningen och programinnehållet diskuteras i en programgrupp inom SKBs enhet för Utveckling. Med FUD-programmet som grund utarbetas årliga planeringsrapporter som relativt detaljerat beskriver det närmaste årets arbete. Det internationella samarbetet koordineras i en International Joint Committee (IJC). För att ge råd och synpunkter på program och resultat ordnas Technical Evaluation Forums (TEF) i samband med IJCs sammanträden. I TEF deltar, förutom IJC medlemmarna, tekniska experter från varje organisation som deltar i Äspölaboratoriets verksamhet.

Äspölaboratoriet utgör en avdelning inom SKBs huvudenhet Utveckling. Verksamheten vid Äspölaboratoriet drivs i huvudsak i projektförhållande. De olika forskningsprojekten leds av projektledare och Äspölaboratoriets personal svarar för organisation och genomförandet av arbeten på Äspö.

Information om Äspölaboratoriet sker på flera sätt. Allmänhet och närboende informeras på platsen. En särskild besöksnisch är iordningställd i tillfartstunneln där SKBs verksamhet och Äspölaboratoriet presenteras. Utställningar som beskriver Äspölaboratoriets verksamhet och resultat finns även i Äspö By. Vidare finns allmän information i utställningslokalen i Simpevarps by och en "naturstig" ute på Äspö; båda är öppna för allmänheten.

13 ALTERNATIVA METODER

Djup geologisk förvaring av långlivat radioaktivt avfall är allmänt accepterad bland internationell expertis som en bra metod som kan genomföras på ett sätt som tillgodoser fundamentala etiska och miljömässiga krav. Samtidigt som forsknings- och utvecklingsarbetet på direkt slutförvaring av använt kärnbränsle fullföljs genom byggande av anläggningar för inkapsling och ett första steg för djupförvaring finns det dock skäl att avdela vissa resurser åt uppföljning av alternativa metoder till SKBs huvudlinje. Detta är också i linje med kärntekniklagens krav på ett allsidigt program. Internationellt drivs FoU-arbete på såväl alternativa behandlingsmetoder för det använda bränslet som på alternativa slutförvaringsmetoder. Genom SKBs väl utvecklade internationella samarbetsnät säkras en bred insyn i de huvudprogram som pågår i andra länder. För vissa specifika utvecklingslinjer som endast kan förväntas vinna tillämpning på längre sikt är det dock motiverat med en begränsad egen insats. Detta skapar en inhemsk kompetens på området som medger att Sverige får insyn i de bredare program som genomförs i andra länder. I regeringsbeslutet över FUD-program 92 /13-1/ angav regeringen att SKB i det nu aktuella programmet skulle redovisa sin bedömning av de alternativa metoder som är aktuella.

Största intresset i den vetenskapliga och i den allmänna debatten bland alternativa metoder till geologisk djupförvaring har under senare år ägnats transmutation av de långlivade radioaktiva ämnena som finns i avfallet. Denna teknik kräver uppärbetning av det använda kärnbränslet och separation av de långlivade radioaktiva ämnena från resten av avfallet. Läget på detta område redovisas i avsnitt 13.1.

Andra alternativ till geologisk förvaring ägnas inget direkt intresse utan dessa har mer eller mindre avfärdats. Fortsatt övervakad lagring tills vidare är enda undantaget. Sådan kan genomföras på många sätt och för det svenska kärnbränslet sker det nu i CLAB. Övervakad lagring fyller emellertid ej det långsiktiga målet som kommit till uttryck i lagens krav på slutförvaring på ett säkert sätt.

Bland olika alternativ till geologisk förvaring finns för svenskt vidkommande ett visst uttalat intresse från några håll av förvaring i djupa borrhål. Aktuellt läge för detta alternativ redovisas kortfattat i avsnitt 13.2

13.1 SEPARATION OCH TRANSMUTATION (P&T) AV LÅNGLIVADE RADIOAKTIVA ÄMNEN

13.1.1 Bakgrund

Möjligheten till separation och transmutation (nedan förkortat P&T från engelskans Partitioning and Transmuta-

tion) av långlivade nuklider i det högaktiva avfallet har tilldragit sig förnyat intresse på senare år. Relativt stora program pågår eller planeras i Frankrike, Japan, Ryssland och USA. Utvecklingen följs från svensk sida, och kontakter med dessa program har etablerats av svenska forskare. SKB stödjer begränsade forskningsinsatser med denna inriktning vid svenska högskoleinstitutioner.

Omfattande studier av separation och transmutation gjordes i flera länder under 1960-, 1970- och början av 1980-talet. Detta gav breda kunskaper inom vissa delar av området men intresset avtog i takt med att de stora satsningarna på brydreaktorer minskades och intresset för uppärbetning och plutoniumåterföring avtog. Ett förnyat intresse visade sig i slutet av 1980-talet. Ett "Specialist Meeting on Accelerator-Driven Transmutation Technology for Radwaste and other Applications" hölls i Saltsjöbaden 24-28 juni 1991 på initiativ av bl a dåvarande kärnbränslenämnden, SKN /13-2/. Efter detta möte gjordes på SKBs initiativ genomgångar av aktuella projekt och rapporter från dessa genomgångar presenterades 1992-1993 /13-3, 4, 5/. En uppdatering av utvecklingen sedan dess presenteras i en teknisk rapport som är under publicering /13-6/.

13.1.2 Radionuklider av intresse för P&T

Med hänsyn till den potentiella farligheten (och utan beaktande av den geologiska barriären i ett djupförvar) är aktiniderna de viktigaste radionukliderna som bör övervägas för eventuella P&T-koncept. Det finns emellertid även några långlivade klyvningsprodukter som kan vara av betydelse. En jämförelse mellan radiotoxiciteten för aktinider och för några långlivade klyvningsprodukter i använt bränsle framgår av Tabell 13-1. Av tabellen framgår att den relativa toxiciteten för aktinider är flera storleksordningar större än för de långlivade klyvningsprodukterna.

13.1.3 Transmutation

Grundprincipen för transmutation av grundämnen är att dessa bestrålas med neutroner (även protoner, tyngre joner och fotoner har övervägts) och att (långlivade radioaktiva) atomkärnor via kärnreaktioner omvandlas till kortlivade eller stabila. För att denna omvandling skall ske med högt utbyte krävs en hög neutronflux. Denna kan åstadkommas på olika sätt beroende på vilka ämnen man vill omvandla. En grundförutsättning för att det hela skall fungera på ett effektivt sätt är att de ämnen som man vill transmutera kan separeras från andra ämnen som annars skulle konkurrera om neutronerna och därigenom påtagligt minska processens effektiva utbyte.

Tabell 13-1. Relativ jämförelse av radiotoxiciteten för aktinider och några lång-livade klyvningsprodukter i använt kärnbränsle efter 100 års avsvälgning.

Nuklid	t _{1/2} (år)	Mängd ¹⁾ (g/ton IHM)	Specifik aktivitet ¹⁾ (Bq/ton IHM)	Dosfaktor ²⁾ (Sv/Bq)	Relativ toxicitet (Sv/ton IHM)
²³⁷ Np	2.1x10 ⁶	689.5	1.8x10 ¹⁰	1.7x10 ⁻⁶	3.0x10 ⁴
²⁴¹ Am	4.3x10 ²	972.7	1.2x10 ¹⁴	1.7x10 ⁻⁶	2.1x10⁸
²⁴³ Am	7.4x10 ³	145.5	1.1x10 ¹²	1.7x10 ⁻⁶	1.8x10 ⁶
²⁴⁵ Cm	8.5x10 ³	6.9	4.4x10 ¹⁰	1.7x10 ⁻⁶	7.3x10 ⁴
²³⁸ Pu	8.8x10 ¹	142.8	9.1x10 ¹³	1.3x10 ⁻⁶	1.1x10⁸
²³⁹ Pu	2.0x10 ⁶	5641.	1.3x10 ¹³	1.3x10 ⁻⁶	1.6x10⁷
²⁴⁰ Pu	6.6x10 ³	1611.	1.4x10 ¹³	1.3x10 ⁻⁶	1.7x10⁷
²⁴¹ Pu	1.4x10 ¹	9.5	3.6x10 ¹³	2.5x10 ⁻⁸	9.0x10 ⁵
²⁴² Pu	3.8x10 ⁵	439.5	6.4x10 ¹⁰	1.3x10 ⁻⁶	8.0x10 ⁴
⁷⁹ Se	6.5x10 ⁴	5.2	1.4x10 ¹⁰	5.0x10 ⁻⁹	68.
⁹³ Zr	1.5x10 ⁶	770.4	7.2x10 ¹⁰	7.1x10 ⁻¹⁰	51.
⁹⁹ Tc	2.1x10 ⁵	849.	5.3x10 ¹¹	1.7x10 ⁻⁹	883.
¹⁰⁷ Pd	6.5x10 ⁶	181.1	3.4x10 ⁹	1.7x10 ⁻¹⁰	0.6
¹²⁶ Sn	1.0x10 ⁵	11.8	1.2x10 ¹⁰	1.7x10 ⁻⁸	206.
¹²⁹ I	1.6x10 ⁷	215.1	1.4x10 ⁹	2.5x10 ⁻⁷	345.
¹³⁵ Cs	2.3x10 ⁶	262.7	8.6x10 ⁹	5.0x10 ⁻⁹	43.

¹⁾Referens: SKI Technical Report 90:18 J O Liljenzin, April 1990.

²⁾Dosfaktorn är förhållandet mellan årlig max-dos för arbetare – 50 mSv – och ALI-värdet för isotopen.

ALI = Annual Limit of Intake enligt ICRP

IHM = Initial Heavy Metal

De "apparater" som har högst potential att åstadkomma erforderlig neutronflux är för närvarande högfluxreaktorer och acceleratordrivna underkritiska reaktorer.

Det finns flera förslag till hur man skall genomföra P&T. Den grundläggande frågan om syfte och mål med "transmutation" har dock ej besvarats entydigt i de olika förslagen. Flera olika svar om syftet framförs i argumenteringen för ökad FoU på området t ex:

- destruktion av aktivt avfall från konventionella kärnreaktorer,
- produktion av kärnenergi utan användning av konventionella kärnreaktorer,
- destruktion/denaturering av befintligt överskottsmaterial till kärnvapen, dvs Pu²³⁹,
- snabb produktion av kärnvapenmaterial, d v s H³, U²³³ och Pu²³⁹, eller
- introduktion av ny bränslecykel baserad på torium, vilken skulle ge mindre innehåll/omsättning/handtering av plutonium och tyngre aktinider än exempelvis lättvattenreaktorerna eller brytarens bränslecykel.

Om syftet i första hand är att nå en avsevärd allmän reduktion av radiotoxiciteten hos det avfall som måste slutförvaras krävs utveckling av ny teknik t ex ett acce-

leratorbaserat system. För att uppnå detta fordras ett större tekniskt genombrott.

För att nå en internationell samverkan på P&T-området är det nödvändigt att bättre bli ense om syftet med P&T.

13.1.4 Upparbetning och separation

Transmutation av långlivade nuklider kräver någon form av upparbetning. Genom upparbetning återvinnes kvarvarande uran och plutonium från använt bränsle. Dessa ämnen utgör ca 96% av det använda bränslet (frånsett kapslingen). Normalt planeras ej förbränning av uran i olika P&T-koncept. Detta används i stället som bränsle i t ex lättvattenreaktorer. Upparbetning i industriell skala baseras idag på PUREX-processen som utvecklades på 1950-talet. Förbättringar av driftförhållandena och reducerad mängd sekundärt avfall har med tiden givit minskade förluster av uran och plutonium i denna process.

Ytterligare reduktion av dessa förluster kan förväntas om man i den befintliga PUREX-processen ersätter TBP (tributylfosfat) med en monoamid. Monoamider består endast av atomerna C, H, O och N och är således helt brännbara medan förbränning av TBP producerar fosforsyra eller oorganiska fosfater.

För närvarande återvinns ej neptunium vid upparbetning av använt bränsle. Det är emellertid känt att man genom noggrann dosering av saltpetersyrlighet i det primära separationssteget kan få nästan allt neptunium att följa med uranet. Genom att lägga till ett uran-neptunium separationssteg i uranreningskretsen är det då möjligt att återvinna båda ämnena i ren form.

Allt americium, curium och tyngre aktinider tillsammans med neptunium samt spår av uran och plutonium följer i nuvarande PUREX-process det högaktiva vätskeformiga avfallet (HLLW) och återfinns slutligen i det förglasade avfallet. Pågående forskning i Europa (delvis stödd av EU) och Japan syftar till att fullständigt återvinna alla aktinider från HLLW innan förglasning sker. Som redan nämnts kan neptunium återvinnas genom lämplig justering av driftparametrarna i existerande PUREX-anläggningar. En fullständig återvinning av alla aktinider kräver utbyggnad för ytterligare behandling av HLLW.

För att förenkla sådan behandling av HLLW är det nödvändigt med utveckling av lämpliga nya reagens. Primärkandidater är olika diamider och TPTZ-derivat (TPTZ = tripyridyltriasin). En lämplig diamid skulle extrahera alla aktinider och lantanider (men inga andra klyvningsprodukter) från HLLW utan behov att minska syrahalten. Separation av aktinider från lantanider kunde sedan ske med hjälp av TPTZ-derivat. Båda typerna av reagens är fullständigt brännbara.

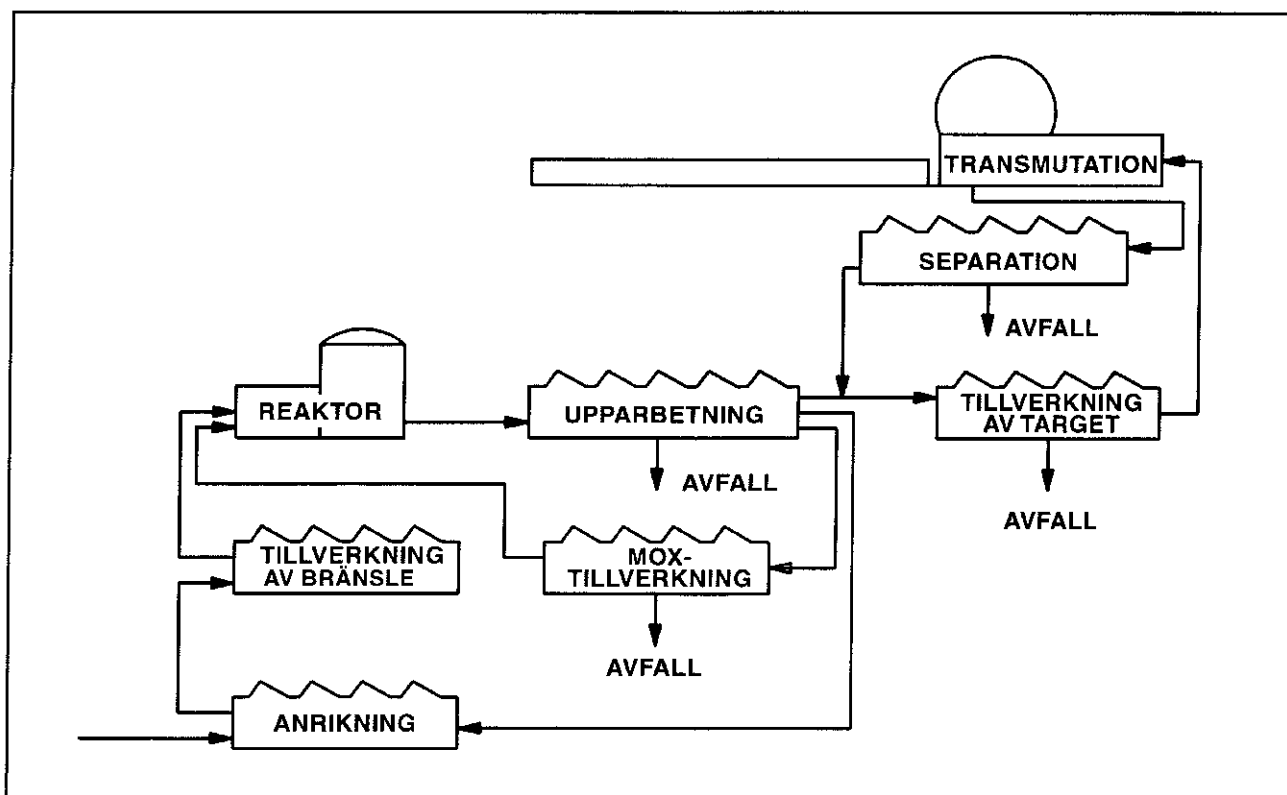
En forskargrupp vid Los Alamos har föreslagit ultracentrifugering av smälta metaller, smälta salter eller vat-

tenlösningar som ett alternativ till den vanliga kemiska separationen av klyvningsprodukter från aktinider.

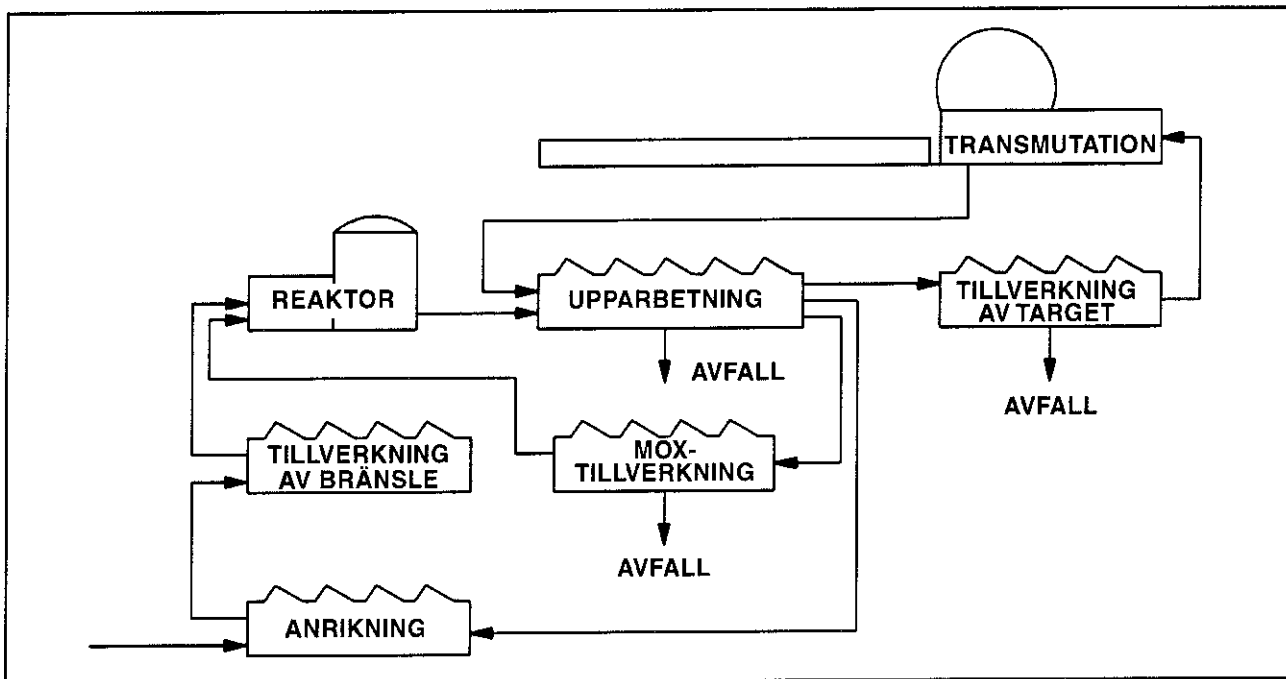
13.1.5 Återföring och förluster

Effektiviteten hos transmutation av ett visst ämne kan bl a anges av den reduktionsfaktor med vilken mängden av ämnet i det avfall som måste deponeras kan minskas genom P&T. Denna faktor bestäms i sin tur av antalet cykler som ämnet måste återföras genom transmutationsreaktorn och av verkningsgraden för den kemiska separationen i varje cykel. Ju mindre mängd som kan transmutteras (d v s ju mindre utbränning) i varje cykel desto fler cykler krävs. Ju fler cykler som krävs desto större förluster till avfall blir det vid en viss given separationsverkningsgrad per cykel. För att hela processen ska ska vara värd besväret bör reduktionsfaktorn var större än 100, d v s mer än 99% av ämnet bör transmutteras.

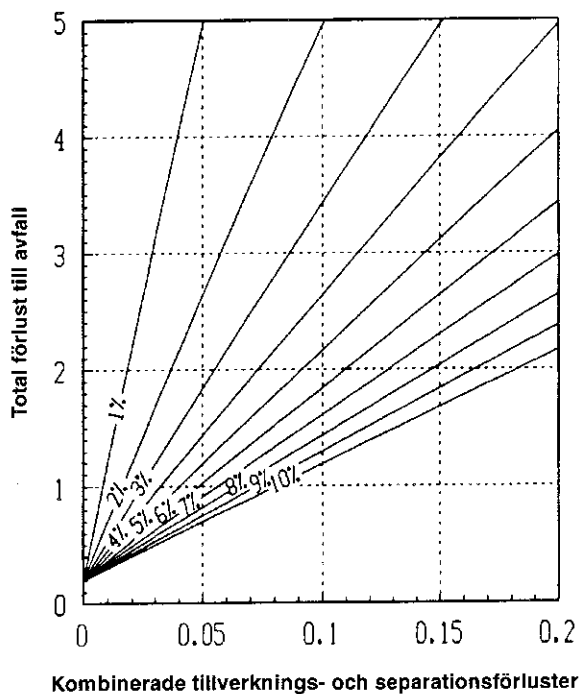
Figurerna 13-1 och 13-2 visar två något olika idealiserade bränslecykler. Den ena (13-1) innebär att upparbetning av kärnbränslet och av de ämnen som skall transmutteras görs var för sig. Den andra (13-2) att all upparbetning och separation görs i samma anläggning. Avfall – förluster – uppkommer vid de olika tillverknings- och separationsstegen. De totala förlusterna till avfall för respektive cykel illustreras av Figurerna 13-3 resp 13-4. Dessa exempel visar klart att förlusterna i tillverknings- och separations- resp upparbetningsstegen måste vara



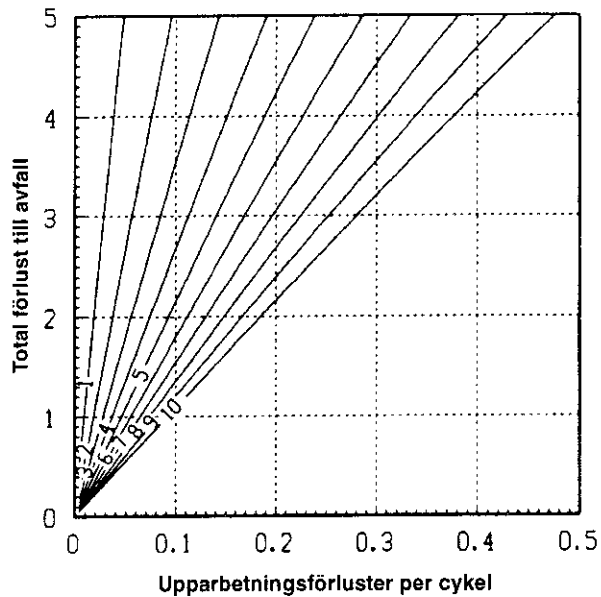
Figur 13-1. Bränslecykel med heterogen transmutations-/separationsdrift.



Figur 13-2. Bränslecykel med homogen uppabetning av använt bränsle och target.



Figur 13-3. Samband mellan total förlust till avfall och förluster i varje transmutionscykel vid separat uppabetning för några utbränningsvärden per cykel för target. Antagna uppabetningsförluster 0,2%.



Figur 13-4. Samband mellan total förlust till avfall och förluster i uppabetning per cykel vid homogen (gemensam) uppabetning för några utbränningsvärden per cykel för target. Antagna tillverkningsförluster är 10% av uppabetningsförlusten. Förluster och utbränningsvärden i Figur 13-3 och 13-4 anges i %.

mycket små för att hålla nere den totala förlusten till avfallet. T ex: – med 5% utbränning per cykel och 0,5% förluster vid uppberetning måste de sammanlagda förlusterna vid separation och tillverkning vara mindre än 0,025% per cykel om man vill få en reduktionsfaktor på större än 100. Det är mycket tveksamt om man kan konstruera och driva anläggningar i industriell skala med så små förluster.

13.1.6 Pågående P&T program i andra länder

Flera länder genomför forskningsprogram avseende P&T. I Frankrike, Japan och Ryssland har dessa program politiskt och institutionellt stöd som ett komplement till en framtida kärnenergi strategi. I USA är flera forskningsgrupper inblandade i olika aktiviteter. Vidare bedriver ett antal länder verksamhet av liten eller måttlig omfattning med inriktning på diverse P&T optioner.

Franska SPIN-programmet

I Frankrike påbörjade man återföring av plutonium i LWR på reguljär bas år 1990.

Uppberetningsanläggningarna i Frankrike använder vattenbaserade processer för återvinning av uran och plutonium från använt kärnbränsle. Utvecklingen av separationsteknik baseras därför på vätskeextraktion eftersom denna passar i det existerande systemet. Man kräver även att vätskorna endast skall innehålla C, H, O och N för att garantera fullständig förbrännbarhet.

P&T av långlivade ämnen är ett av målen i den franska lag som antogs i slutet av 1991. Med anledning därav startade CEA (Commissariat à l'Energie Atomique) det s k SPIN-programmet (SeParation – INCineration). Syftet med detta är att reducera volymen och radioaktiviteten för de avfall som skall deponeras i geologiskt slutförvar. SPIN-programmet uppdelas i två underprogram – ett kortsiktigt kallat PURETEX och ett mera långsiktigt ACTINEX /13-7/.

PURETEX avser förbättringar av den traditionella PUREX-processen. Plutonium och neptunium avskiljs mer effektivt genom användning av en monoamid som är helt brännbar och ej bidrar till sekundärt avfall på samma sätt som TBP.

ACTINEX-programmet avser selektiv och specifik separation av alla aktinider och långlivade klyvningsprodukter. De separerade aktiniderna planeras att bli transmuterade i PWR eller i bldreaktorer. Tre huvudvägar för separation studeras:

- Samextraktion av aktinider och lantanider med diamid i första steget och sedan extraktion av aktiniderna från lantaniderna i ett andra steg med användning av TPTZ.
- Utveckling av nya reagens t ex picolinamid som extraherar aktiniderna selektivt och lämnar lantaniderna i vätskefasen. Denna väg är fördelaktigare

eftersom man slipper extrahera stora mängder lantanider.

- Separation av americium vid högre oxidationstillstånd än tre.

Den tekniska möjligheten att använda U-Pu och U-di-oxid för återföring och transmutation av "minor actinides" har visats i bestrålningsexperimentet inom det s k SUPERFACT – projektet. Ytterligare experiment planeras inom detta projekt.

Japanska OMEGA-programmet

År 1987 godkände AEC (Atomic Energy Commission) i Japan programmet OMEGA (Options for Extra Gain from Actinides) /13-8/ – ett program för FoU om P&T-teknik. De transmutationsmetoder som övervägs baseras antingen på en accelerator eller på en kärnreaktor.

Huvuddelen av FoU inom programmet utförs vid JAERI, PNC och CRIEPI. Programmets fas 1 skall avslutas 1996. Fas 2 planeras genomförd 1997-2000 och kommer att omfatta tekniska prov och demonstrationer av de koncept som utvalts på grundval av fas 1.

Vid JAERI pågår en konceptuell studie av accelerator-drivna transmutationssystem. Bl a studerar man dels system med fast bränsle och spallationstarget av fast material och dels system med bränslet som saltsmälta och spallationstarget av flytande material. I båda fallen utnyttjas snabba neutroner för transmutationen. PNC har också studerat system baserat på en elektronaccelerator och gamma-neutron-reaktioner med Cs- och Sr- isotoper. Denna metod bedöms som ineffektiv. Huvuddelen av de japanska ansträngningarna syns emellertid inriktade på användning av existerande eller nya reaktorer (aktinidbrännare) för transmutation.

De fyra grupper av separationsprocesser som utvecklas vid JAERI under fas 1 baseras på DIDPA (diisodecyl fosforsyra) och DTPA (dietylentriamin-pentaättiksyra). De kommer att prövas på verklig HLLW vid NUCEF-anläggningen i forskningscentret vid Tokai. Upplösning av anrikat uran för kriticitetsprov började hösten 1994 och aktiv drift väntas starta under 1995.

Ryska studier

I Ryssland pågår studier av P&T/13-9/. Flera forskningscentra under ministeriet för atomenergi i Ryska Federationen deltar i dessa. De nuklider som man planerar att transmutera är "minor actinides" och klyvningsprodukterna Tc⁹⁹ och I¹²⁹. Förbränning av aktinider planeras i första hand att ske i snabba reaktorer men accelerator-drivna system undersöks också. Såväl specialkonstruerade som traditionella snabba reaktorer övervägs. Preliminära resultat visar att natriumkylda reaktorer av s k BN-typ effektivt kan utnyttjas för förbränning av "minor actinides" och plutonium. Av säkerhetsskal måste koncentrationen av "minor actinides" i MOX-bränsle vara mindre än 5%. Under dessa förhållanden kan en bldreaktor (typ BN-800) transmutera upp till 100 kg "minor actinides" per år, vilket motsvarar produktionen i tre st

lättvattenreaktorer (typ VVER) á 1000 MWe. En preliminär undersökning visar att en reaktor för P&T-alternativen är två ggr så dyr som direktdeponering av solidifierat avfall. Man anser att det är omöjligt att förutsäga kostnaden för en acceleratordriven P&T-anläggning.

Studier i USA

I USA har flera strategier för P&T av kärnavfall presenterats. Stödet från de ansvariga statliga organen till utveckling av P&T är magert eller obefintligt. Syftet med P&T i USA är därför oklart. Följande skäl har emellertid ofta anförts:

- destruktion av aktinider och långlivade klyvningsprodukter från pågående eller tidigare kärnenergi-program,
- utveckling av ett "proliferation"-säkert kärnenergisystem,
- snabb destruktion av överskottsplutonium för kärnvapen,
- ett kärnenergisystem utan långlivat radioaktivt avfall.

Vid Los Alamos National Laboratories (LANL) pågår ett P&T-program, ADTT (=Accelerator-Driven Transmutation Technologies), som i första hand grundas på användning av linjär accelerator i kombination med olika koncept för underkritisk reaktor. Ett av koncepten kallas ABC (=Accelerator-Based Conversion) och syftar till förbränning av vapenplutonium. Man räknar med att åstadkomma mycket hög utbränning av plutonium utan uppärbetning genom att utnyttja neutroner både från acceleratorns spallationsmål och från reaktorn. Ett annat delprojekt kallat ADEP (=Accelerator-Driven Energy Production) är möjligen huvudinriktningen för transmutationsforskningen vid LANL och baseras på thorium-uran bränslecykeln där Th^{232} omvandlas till den klyvbara isotopen U^{233} . Processen ger både energiutvinning och transmutation. Den föreslagna reaktorteknologin tillämpar erfarenheter från saltsmältereaktorexperimentet (MSRE=Molten Salt Reactor Experiment) i Oak Ridge under 1960-talet. Målet med ADEP-konceptet är en framtida energikälla som producerar mindre mängd långlivade radioaktiva ämnen än nuvarande kärnreaktorer. Ett tredje delprojekt kallas ATW (=Accelerator Transmutation of Waste) och inriktas på att transmutera aktinider och långlivade klyvningsprodukter från lättvattenreaktorer och från avfall efter kärnvapenprogrammet. I detta delprojekt läggs stor vikt på att separationsmetoderna inte skall "frigöra" rena klyvbara material som skulle kunna avledas till kärnvapentillverkning. I både ADEP- och ATW-koncepten är tanken att använda en underkritisk grafitmodererad saltsmältereaktor. Från reaktorn tas kontinuerligt ut ett flöde av saltsmälta från vilket klyvningsprodukterna separeras.

PHOENIX-konceptet i Brookhaven National Laboratory grundas i huvudsak på existerande teknik med viss

utveckling. Transmutation är tänkt att ske med snabba neutroner. PHOENIX beskrivs i /13-3/.

Arbeten inom EU

På uppdrag från EU genomfördes strategiska studier av P&T vid tre europeiska forskningsinstitut under programperioden 1991-1994. CEA i Frankrike undersökte potential och kostnad för P&T av långlivade nuklider. Siemens i Tyskland analyserade avancerade reaktorer ("converters") för transmutation och deras säkerhet. ECN i Nederländerna har bearbetat kärndata för transmutationsstudier.

Det nya EU-programmet "Nuclear Fission Safety" innehåller flera forskningsområden för P&T. Det är ännu oklart hur mycket medel som kommer att allokeras till dessa områden. Svenska grupper medverkar i två av de projekt som nyligen antagits av EU.

Andra internationella organisationer

Flera andra internationella organ berörs även av P&T-arbeten. OECD/NEA koordinerar en serie "workshops" för informationsutbyte mellan medlemsländerna.

IAEA organiserade ett möte med en Technical Committee om säkerhets- och miljöaspekter på P&T i slutet av 1993 /13-10/. Mötet rekommenderade IAEA att studera säkerhets-, omgivnings- och "icke-spridnings"-aspekter på P&T. Speciella områden som bör utredas är

- definition av farlighetskriterier,
- möjlig reduktion av farlighet genom P&T, samt
- prioriteringslista för radionuklider som skall beröras av P&T.

Eftersom dessa områden har en stark koppling till hur ett geologiskt slutförvar fungerar så bör experter inom slutförvarforskningen delta i arbetet.

13.1.7 Några slutsatser

Man kan konstatera att i dag finns det tekniska möjligheter till transmutation av en betydande del av det plutonium som bildats i använt kärnbränsle. För vissa andra långlivade ämnen finns möjligheterna till transmutation (i begränsad omfattning) genom en måttlig utveckling. Utveckling av föreslagna mer avancerade metoder för transmutation till industriell skala kräver emellertid i vissa avseenden ett tekniskt genombrott samt lång tids arbete och stora resurser. Enbart det faktum att transmutation fordrar uppärbetning gör att kostnaderna för en avfallshantering baserad på transmutation av långlivade nuklider vid dagens kostnadsnivå blir väsentligt mycket högre än för direkt deponering av icke-upparbetat kärnbränsle.

Det är svårt att finna något ekonomiskt motiv eller kortsiktigt säkerhetsmässigt motiv för transmutation vid

en jämförelse med idag industriellt etablerade system för hantering av använt kärnbränsle (direktdeponering och upparbetning/förglasning samt slutförvaring). Bedömningen är snarare att stråldoser till personalen i samband med hantering och behandling kommer att bli väsentligt större för transmutionsfallet. Även om utvecklingen av transmutation blir framgångsrik kommer det att finnas ett behov av djupförvaring av sådant långlivat avfall som oundvikligen uppkommer från den relativt komplicerade behandlingsprocessen.

Transmutation med användning av neutroner från kärnreaktorer eller av spallationsneutroner (alstrade med acceleratorteknik) övervägs fortfarande. Kärnreaktorer har kommit betydligt längre i utveckling än spallationskällor. Detta gäller såväl termiska som snabba neutroner. Om man vill transmuttera aktinider med mycket små reaktionstvårsnitt för neutroner kan det dock visa sig att detta endast kan ske med spallationsneutroner.

Vid bestämning av målen för den separationsprocess som behövs måste man beakta den starka koppling som finns mellan verkningsgraden för separation och transmutation samt acceptabla förluster till sekundära avfallsströmmar. För separation övervägs vattenbaserade processer, saltsmältebaserade processer och metallurgiska processer. Den nuvarande kunskapen om vattenbaserade processer är omfattande och baserad på mer än 40 års erfarenheter. Metallurgiska och till stor del även saltsmältebaserade processer befinner sig på forskningsstadiet. Det är därför för tidigt att dra några definitiva slutsatser om dessa separationsprocesser. Allmänt kan man konstatera att forskning om teknik för separation ingår i större omfattning i nyare FoU-program än i tidigare. Mycket större resurser måste emellertid i framtiden allokeras till detta område om man vill att P&T-teknik skall bli ett realistiskt alternativ till nuvarande kärnbränslecykel.

Införande av P&T kommer inte att eliminera behovet av deponering av radioaktivt avfall. Långlivade radioaktiva ämnen kan inte transmutteras i stora mängder utan vissa förluster till sekundära avfallsströmmar. Vid en total bedömning av P&T-tekniken är det därför viktigt att även uppskatta riskerna för utsläpp från behandlingsprocessen och slutförvaringen av sekundäravfallet, så att den totala risken för utsläpp till biosfären (på kort och lång sikt) inte blir större än den mest pessimistiska prognosen för risken för utsläpp från direkt djupförvaring av använt bränsle. Även om det finns en internationell konsensus att nuvarande bränslecykelscenarier inklusive geologisk slutförvaring ger tillräckligt skydd för människor och miljö så finns på många håll ett starkt intresse att studera hur en ytterligare minskning av den långsiktiga potentiella farligheten kan åstadkommas och till vilken kostnad. Den allvarligaste kritiken mot geologisk förvaring är den begränsade förmågan att förutsäga framtida effekter. Det är emellertid viktigt att fråga sig om stöd till utveckling av P&T kommer att dölja det faktum att den absoluta risken av radioaktiva utsläpp från föreslagna djupförvar och avfallsformer redan i sig är mycket liten?

Utveckling och tillämpning av P&T är mer trolig i ett scenario med fortsatt användning och expansion av kärnenergi än i det motsatta scenariet. Man diskuterar om expansion av kärnenergi med stöd av P&T skulle kunna vara ett rimligt mål eller om P&T respektive expansion av kärnenergin skall bedömas oberoende av varandra. En utveckling och introduktion av P&T inom ramen för nuvarande kärnenergi-program med "engångsanvändning" av uranbränslet har mycket små incitament. Vid ett eventuellt beslut om mer långsiktig utnyttjning av kärnenergin kommer saken delvis i ett annat läge. En sådan utveckling – globalt sett – skulle på sikt sannolikt medföra en ökning av nuvarande kostnader inom kärnbränsleförsörjningen vilket i sin tur gör andra bränslecykelscenarier mer ekonomiskt konkurrenskraftiga.

P&T utvärderas fortfarande i flera länder och av internationella organisationer med hänsyn till dess potential som långsiktig energiresurs i kombination med potential för destruktion av långlivade ämnen. Det är svårt att se hur P&T skulle kunna utvecklas enbart på nationell grund men till de mycket stora insatser som krävs. Internationell samverkan är därför väsentlig. För detta krävs dock att man är någorlunda ense om motiven. En synes dessa vara mycket olika i t ex Europa och USA.

Utvecklingen av P&T kan möjligen på lång sikt bli av intresse för det svenska kärnavfallsprogrammet. Det är därför angeläget att även fortsättningsvis följa den utveckling som pågår i andra länder. Forskning på detta område spänner över flera nyckeldiscipliner på kärnenergiområdet såsom reaktorfysik, neutronfysik, kärnkemi, materiallära, kärnreaktorsäkerhet, kärnreaktorteknologi och strålskydd. Spetsteknologin gör att ämnesområdet är attraktivt för unga forskarstuderande. Insatser på området kan därför bidra till att upprätthålla och förny forskarkompetensen inom nämnda discipliner till främja även för kärnenergiområdet i stort.

SKB avser för sin del att inom ramen för studier av alternativa avfallsstrategier ge fortsatt stöd till inhemsk forskning som syftar till fördjupad förståelse av säkerhetsfrågor, materialfrågor och frågor av betydelse för bedömning av hela processen. Denna forskning bör som hittills drivas i nära kontakt med den internationella utvecklingen.

13.2 GEOVETENSKAPLIGA FÖRHÅLLANDEN PÅ STORA DJUP

1992 avslutades Projekt Alternativstudier för Slutförvar (PASS) /13-11/. I detta projekt studerades alternativa system för djupförvaring och jämförelser gjordes med referensalternativet enligt KBS-3 metoden. Ett av de alternativ som studerades var förvaring i mycket djupa (2000-4000 m) borrhål.

Ingen ytterligare utveckling i teknisk mening har sedan skett av koncept för förvaring på stora djup. Däremot fortgår en allmänt inriktad forskning i kunskapsbyggande syfte. Som ett led i denna forskning genomförs en studie av de geovetenskapliga förhållandena på stora

djup i berget. Huvudmålet är att öka kunskapen om sådana parametrar och processer som har betydelse för de säkerhetsmässiga och tekniska förutsättningarna för avfallsförvaring på stora djup. Studiens omfattning och uppläggning beskrivs närmare i /13-12/. Parallellt bevakas också utvecklingen inom området borrhningsteknik för mycket djupa borrhål.

I ett första steg har litteraturstudier gjorts för att sammanställa och värdera tillgängliga data om betydelsefulla geovetenskapliga parametrar. Även för koncept för förvaring på stora djup gäller att den radiologiska säkerheten är avhängig mekanisk stabilitet, kemiskt stabil omgivning med syrefria förhållanden och en låg grundvattenomsättning. Tabell 13-2 visar ämnesområden och exempel på parametrar som behandlats. Sammanställningarna och värderingarna av tillgängliga data redovisas i separata rapporter /13-12,13/. Kravet att resultaten skall vara relevanta för förhållanden i svenskt urberg har inneburit att sammanställningarna i huvudsak begränsats till information från den Baltiska Skölden och från andra kontinentala urbergsområden.

Tabell 13-2. Exempel på geovetenskapliga parametrar för vilka data från djupintervallet 1000 - 5000 m sammanställts.

Ämnesområde	Exempel på studerade parametrar
Geologi - litologi	Bergarter, metamorfosgrad, struktur
Geologi - tektonik	Sprickor (frekvens, orientering, mineralisering mm) Sprickzoner (frekvens, orientering, morfologi)
Hydrogeologi	Tryck, konduktivitet, frekvens av konduktiva sprickor
Hydrokemi	Grundvattnets kemiska sammansättning och ursprung Isotoper
Bergmekanik	Bergspänningar, hållfasthet
Geofysik	Porositet, densitet m m Geotermiska parametrar Seismiska parametrar

Data som sammanställts avser intervallet 1000 - 5000 meter djup. Direkta mätdata från så stora djup kan bara fås från djupa borrhål och gruvor. Flera länder genomfört, eller har genomfört, omfattande forskningsinriktade djupborringsprogram karaktär. Dessa program har genererat en stor mängd geovetenskapliga data från det

aktuella djupintervallet och gett värdefulla erfarenheter av borrhings- och undersökningsverksamhet. Av speciellt intresse för svensk del är djupborrningar som genomförts i kristallin berggrund i det förra Sovjetunionen och i Tyskland. Data och erfarenheter från de mycket omfattande sovjetiska undersökningarna har kommit SKB till del genom ett samarbete med ryska organisationer. Resultaten har redovisats i en särskild rapport /13-14/. Materialet innefattar bl a geovetenskaplig information från ett drygt 12 000 m djupt borrhål beläget på Kolahalvön, dvs inom den Baltiska Skölden.

De djupaste gruvorna i världen når ner till cirka 4 500 meters djup. I bl a Kanada och Sydafrika finns ett flertal gruvor med djup ner till ca 2 500 m. Den geovetenskapliga informationen från gruvorna är omfattande, och i vissa avseenden unik. Ett exempel är den kunskap som gruvdrift på stora djup gett inom det bergmekaniska området. För att kunna tillgodogöra sig kunskapen från gruvorna och applicera den inom andra områden krävs emellertid ett betydande analysarbete och ingående studier av enskilda praktikfall.

Förutom direkta data från mätningar på stora djup bygger sammanställningarna också på indirekta data från geofysiska undersökningar utförda från ytan. Seismiska mätningar är den viktigaste informationskällan. Den seismiska informationen innefattar både registreringar i samband med naturlig eller inducerad seismisk aktivitet i jordskorpan, och data från aktiva seismiska undersökningar.

Som andra steg i SKBs pågående program om förvaring på stora djup planeras en integrerad tolkning av informationen, med syfte att upprätta beskrivande modeller för viktiga parametrar och processer. Viktiga frågeställningar som måste beaktas i denna tolkningsprocess är bl a följande:

- Tillförlitligheten hos insamlade data från stora djup.
- Möjligheterna att i allmän mening upprätta generaliserade samband och beskrivningar utifrån de stickprov som djupa borrhål utgör.
- Möjligheterna att, i allmän och platsspecifik mening, bedöma förhållandena på stora djup utifrån observationer vid ytan eller på djup där berggrunden kan undersökas med konventionella metoder.
- Närvaro och betydelse av kemiska och fysikaliska processer som inte uppträder vid eller nära ytan.

Vidare kommer viss bevakning även fortsättningsvis att ägnas utvecklingen av borrhningsteknik. Speciella inkapplingskrav vid deponering i djupa hål behöver också utredas.

14 RIVNING AV KÄRNTEKNISKA ANLÄGGNINGAR

14.1 BAKGRUND

När ett kärnkraftverk tas ur drift är delar av det radioaktivt nedsmutsat. Det medför att rivningen måste genomföras på ett kontrollerat sätt med vederbörlig hänsyn till behov av strålskyddsåtgärder utöver konventionellt arbetarskydd. Vidare behöver vissa delar av rivningsavfallet tas om hand och slutdeponeras som radioaktivt avfall. Detta gäller även för övriga kärntechniska anläggningar, t ex CLAB och inkapslingsanläggningen, när de tas ur drift.

Ett flertal mindre forskningsreaktorer och några små och halvstora kärnkraftverk har redan rivits på flera håll i världen. Nu pågår rivningen av ytterligare några halvstora kärnkraftverk, t ex i Japan, USA, Västtyskland, Belgien och Storbritannien. I USA pågår även rivningen av några stora kärnkraftverk, t ex Trojan, en PWR på 1000 MW. Andra reaktorer som har tagits ur drift har iordningställt så att de kan stå 30 – 50 år innan själva rivningen genomförs.

Erfarenheterna av rivning i Sverige är begränsade till rivningen av forskningsreaktorn R1 i Stockholm och några mindre anläggningar i Studsvik. Betydande erfarenheter av liknande slag har dock erhållits vid den genomgripande dekontamineringen och ombyggnaden av Oskarshamn I, vid ånggeneratorbytena i Ringhals-2 och Ringhals-3 samt vid andra reparations- och ombyggnadsarbeten på kärnkraftverken.

De genomförda rivningarna och ett flertal studier visar att metoderna för att riva kärnkraftverken är tillgängliga idag. I en rapport från OECD/NEA /14-1/ konstateras att nästa steg är att vidareutveckla de metoder som provats i halvstor skala till industriellt tillämpbara metoder. Inga principiella problem förutses. Det största hindret vid rivningsarbeten synes för närvarande vara att slutförvar för avfallet i de flesta länder ännu inte har byggts eller att de existerande förvaren inte är anpassade till rivningsavfallet.

Huvuddelen av den utrustning, som behövs vid rivning existerar redan och används rutinemässigt vid underhåll och ombyggnadsarbeten på de svenska kärnkraftverken. Endast för rivning av reaktortanken och dess interna delar, samt för rivning av betongskyddet närmast reaktortanken behövs metoder som ännu ej använts i Sverige. Erfarenheter från användning av sådana metoder erhålles vid de i andra länder pågående rivningsprojekten. Svensk kraftindustri har god insyn i dessa projekt genom ett samarbetsprogram som organiserats i OECD/NEAs regi och där SKB sköter sekretariat och programkoordinering.

14.2 MÅL OCH ÖVERSIKTLIG PLAN

Målet för nedläggningsarbetet efter att ett kärnkraftverk har tagits ur drift är att området efter viss tid skall återställas så att det kan användas utan radiologiska begränsningar. Detta skall genomföras på ett sådant sätt att vare sig den personal som är sysselsatt med nedläggnings- och rivningsarbetet eller allmänheten utsätts för onödigt bestrålning. Nedläggningsarbetet kommer att ske i flera steg. IAEA har definierat tre stadier i nedläggningsarbetet /14-2/, vilka definieras av anläggningens fysiska status.

I **stadium 1** har bränsle och vätskor avlägsnats från reaktorn och manöversystemen bortkopplats. Tillträdet till anläggningen begränsas och anläggningen övervakas och inspekteras periodiskt.

I **stadium 2** har huvuddelen av de komponenter som innehåller radioaktiva ämnen koncentrerats till en begränsad volym, som försluts. Det behövs mindre övervakning än vid stadium 1, men det är önskvärt med fortsatt periodisk inspektion.

I **stadium 3** har allt radioaktivt material (över friklassningsgränsen) avlägsnats och området friklassats. Stadium 3 kallas ibland green field. Som ett alternativ till fullständig friklassning direkt efter att rivningen avslutats kan visst avfall finnas kvar i ett markförvar på platsen och kräva övervakning under ca en femtioårsperiod.

Det är inte nödvändigt att nedläggningen sker stegvis genom de tre stadierna. Stadium 2 tillämpas i första hand om man avser att senarelägga rivningen i förhållande till sluttidpunkten för drift. Man talar ofta om 30 till 100 års senareläggning. Ifall rivningsarbetet påbörjas inom några år efter avslutad drift är det naturligt att gå direkt via stadium 1 till stadium 3.

Vilken tidplan som kommer att användas för de svenska kärnkraftverken har ännu inte bestämts. Ett flertal olika faktorer kommer att påverka detta beslut. De viktigaste är vilken annan verksamhet som planeras på platsen samt tillgången på personal med god anläggningskännedom. Även strålskyddsaspekter och inte minst allmänna politiska aspekter kan också komma att påverka beslutet.

Tillvägagångssättet för att riva de svenska kärnkraftverken har beskrivits i en rapport från SKB, "Teknik och kostnader för rivning av svenska kärnkraftverk" /14-3/. I denna rapport visas att en rivning kan inledas ca ett år efter att det sista reaktorblocket har stängts av vid ett kärnkraftverk. Som ett alternativ visas även att det är

möjligt att lägga anläggningen i malpåse under 30 – 50 år innan det egentliga rivningsarbetet inleds. En tidig rivning innebär bland annat att personal med anläggningsskänedom finns tillgänglig. Vid en senarelagd rivning erhålles en lägre strålningsnivå, vilket ger vissa förenklingar av rivningsarbetet.

När rivningsarbetena skall genomföras kommer det att vara rationellt att ha en gemensam planering för hela landet. Härigenom erhålles fördelar i form av rationell utnyttning av specialutrustning och specialutbildad personal, samt goda möjligheter till erfarenhetsåterföring.

Utgångspunkten för planeringen av den framtida rivningen och av behovet av FoU-insatser är således att ingen rivning kommer att påbörjas förrän tidigast år 2010. Beroende på vilken framtida användning som planeras för kraftverksläget, t ex ifall området kommer att användas för annan kraftproduktion, kan det även finnas motiv för att starta själva rivningsarbetet senare.

De övergripande målen för SKBs insatser inom rivningsområdet är

- att säkerställa att kunskap och teknik för rivning finns utvecklad i god tid innan detaljplaneringen av rivningsarbetet skall påbörjas,
- att säkerställa att avfallet från rivning kan tas om hand, transporteras och slutförvaras, samt
- att genom kostnadberäkningar ge underlag för behovet av fondering av medel för rivningen.

De viktigaste medlen för att uppnå dessa mål är

- uppföljning av den internationella utvecklingen,
- uppföljning av erfarenheter från underhålls- och ombyggnadsarbeten på kärnkraftverken, samt
- vissa speciella studier och tester.

14.3 KUNSKAPSLÄGET

14.3.1 Sverige

En omfattande genomgång av tekniken för att riva de svenska kärnkraftverken och kostnaderna härför har givits i /14-3/. Slutsatsen av denna studie är att rivningen inte förväntas leda till svåra tekniska problem. Huvuddelen av den teknik som behövs för den framtida rivningen av kärnkraftverken finns redan tillgänglig och används rutinmässigt vid underhålls-, reparations- och ombyggnadsarbeten på kärnkraftverken. Specialutrustning behöver endast tas fram för demontering av reaktortanken och för rivning av kraftiga betongkonstruktioner. Stora arbetsinsatser läggs ned inom dessa områden utomlands, och det är av stor vikt att en uppföljning sker. Däremot är det inte nu motiverat med speciella insatser i Sverige.

På kärnkraftverken har under senare år ett antal större ombyggnadsarbeten genomförts. Erfarenheterna från dessa ger värdefulla erfarenheter för den kommande rivningen.

Som alternativ till att sönderdela tanken har en studie genomförts av möjligheten att ta ut och transportera reaktortanken hel och deponera den i SFR /14-4/. Denna metod har potential att ge dos- och kostnadsbesparingar och bör ingå som alternativ när detaljplaneringen av rivningen genomförs.

Vid rivningen erhålles stora mängder svagt kontaminerat avfall. Liknande avfall erhålles från reparationsarbeten på kärnkraftverken. Olika metoder för att ta hand om detta avfall prövas nu, t ex dekontaminering och smältning, samt direkt deponering i SFR.

Kostnaderna för rivning har presenterats i /14-3/. Internationellt sett ligger de svenska kostnaderna lågt, vilket bland annat förklaras av det effektiva system som utvecklats för transport och slutförvaring av avfall i Sverige, som gör att stora komponenter kan tas omhand utan behov av omfattande sönderdelning.

14.3.2 Internationellt

De viktigaste arbetena inom rivningsområdet görs i samband med verkliga nedläggningsprojekt för reaktorer och andra kärntekniska anläggningar, som har tagits ur drift. Hittills har ett drygt 20-tal reaktorer totalavvecklats till stadium 3, dvs de har demonterats och de radioaktiva komponenterna har transporterats bort. Härtill kommer ett större antal anläggningar som har tagits ur drift och överförts till stadium 1 eller 2. De flesta nedläggningsprojekt har berört försöksreaktorer eller små kraftreaktorer. Det är först under de senaste åren som även en del halvstora och stora reaktorer har tagits ur drift.

Parallellt med direkta nedläggningsprojekt sker även viss utveckling av rivningsmetoder. Oftast är den emellertid kopplad till ett visst nedläggningsprojekt. Arbetet sker till stor del på nationell bas, men främst inom OECD/NEA förekommer även internationellt samarbete.

OECD/NEAs samarbetsprogram inom rivningsområdet

Inom OECD/NEA har ett särskilt program för informations- och erfarenhetsutbyte mellan pågående nedläggningsprojekt organiserats. De flesta större nedläggningsprojekt i världen ingår i detta program. Totalt omfattar det för närvarande 29 projekt i 10 länder. En sammanställning över ingående projekt ges i Tabell 14-1. Nitton av projekten syftar till fullständig rivning till stadium 3.

Inom samarbetsprogrammet sker dels ett erfarenhetsutbyte från den dagliga verksamheten, dels mera omfattande diskussioner och informationsutbyte rörande specifika tekniska frågor. Exempel på sådana frågor som diskuterats är smältning av metalliskt avfall, mätmetoder för lågaktivt avfall, rivning av asbest, samt metodik för kostnadsberäkningar och kostnadsredovisning.

Tabell 14-1. OECD/NEA samarbetsprogram inom rivningsområdet. Lista över ingående projekt.

Anläggning	Typ	Planerat slutstadium
Eurochemic, Belgien	Upparbetningsanläggning	Stadium 3
BR-3, Belgien	PWR, 41 MW _t	Stadium 3
Gentilly-1, Kanada	Tungvattenreaktor, 250 MW _e	Stadium 2
NPD, Kanada	Tungvattenreaktor CANDU, 25 MW _e CANDU, 25 MW _e	Stadium 1
Rapsodie, Frankrike	Natriumkyld snabb reaktor, 29 MW _t	Stadium 2
G2, Frankrike	Gaskyld reaktor, 45 MW _e	Stadium 2
AT1, Frankrike	Upparbetningsanläggning för snabbreaktorbränsle	Stadium 3
Niederaichbach, Tyskland	Gaskyld,tungvatten- modererad reaktor 106 MW _e	Stadium 3
Lingen, Tyskland	BWR, 256 MW _e	Stadium 1
MZFR, Tyskland	Tungvattenreaktor, 50 M W _e	Stadium 3
Garigliano, Italien	BWR, 160 MW _e	Stadium 1
Japan Power Demonstration Reactor (JPDR), Japan	BWR, 13 MW _e	Stadium 3
Windscale Advanced Gas Cooled Reactor, Storbritannien	AGR, 33 MW _e	Stadium 3
BNFL Coprecipitation Plant, Storbritannien	MOX-bränsletillverkning	Stadium 3
Shippingport, USA	PWR, 72 MW _e	Stadium 3
West Valley Demonstration Project, USA	Upparbetningsanläggning för LWR-bränsle	Stadium 3
EBWR, USA	BWR, 100 MW _t	Stadium 3
Tunney's Pasture, Kanada	Isotophantering	Stadium 3
BNFL B204 Primary Separation Plant, Storbritannien	Upparbetningsanläggning	Stadium 2
JRTF, Tokai, Japan	Upparbetningsanläggning	Stadium 3
Greifswald, Tyskland	PWR, 5x440 MW _e	Stadium 3
Bohunice A1, Slovakien	Gaskyld tungvatten- modererad reaktor, 150 MW _e	Stadium 1
Vandellos 1, Spanien	Gaskyld reaktor	Stadium 2
HDR, Tyskland	BWR, 25 MW _e	Stadium 3
WAK, Tyskland	Upparbetningsanläggning	Stadium 3
EL 4, Frankrike	Gaskyld, tungvatten- modererad reaktor	Stadium 2
Byggnad 211, Marcoule, Frankrike	Förglasningsanläggning	Stadium 3
Fort St Vrain, USA	Högtemperatur gaskyld reaktor	Stadium 3
Fernald, USA	Uranhexafluoridanläggning	Stadium 3

Erfarenheterna från de första fem åren inom OECD / NEA-programmet har sammanställts i en rapport /14-1/. I denna ges utöver direkta beskrivningar av ingående projekt och det arbete som utförts vid dem, även en genomgripande analys av status och utvecklingsbehov för olika rivningsområden. De områden som tas upp är

- aktivitetsbestämning,
- dekontamineringsmetoder,
- kapningsmetoder,
- fjärrstyrda arbeten,
- avfallshantering, samt
- strålskydd och säkerhet.

För varje område identifieras utvecklingsbehovet. I de flesta fall handlar det om att överföra erfarenheterna från uttestade metoder till tillämpning i industriell skala, samt att få erfarenheter därifrån. **Något område där direkt grundläggande utvecklingsinsatser behövs har inte identifierats.**

De projekt inom programmet som har speciellt intresse för svenskt vidkommande är Shippingport (USA), JPDR (Japan), Niederaichbach (Tyskland) och BR-3 i Belgien. Rivningen av Shippingport är avslutad. Av speciellt intresse var att reaktortanken lyftes ut hel och transporterades med pråm till slutförvaringsplatsen.

Även för JPDR och Niederaichbach är rivningsarbetet i det närmaste avslutade. I båda fallen har reaktortanken skurits ned fjärrstyrt. I JPDR-projektet har en omfattande utprovning och utveckling av olika rivningsmetoder genomförts. Även i BR-3 studeras sönderdelning av reaktortanken efter omfattande dekontaminering.

SKB deltar såsom ansvarig för programkoordineringsfunktionen för OECD/NEA-programmet, och ges därigenom tillfälle att tekniskt följa de olika projekten.

EUs forskningsprogram

EU har sedan 1979 ett gemensamt forskningsprogram inom rivningsområdet. Hittills har studierna i första hand omfattat olika rivningsmetoder, samt frågeställningar kring aktivitetsinnehåll och avfallshantering /14-5/. Följande forskningsområden har ingått

- långtidshållbarhet för byggnader och system,
- dekontaminering,
- rivningsmetoder,
- behandling av vissa avfall: stål, betong och grafit,
- stora avfallsbehållare,
- uppskattning av avfallsmängder.

Vidare pågår arbete med att ta fram riktlinjer för rivningsområdet.

En omfattande redovisning av uppnådda resultat ges i /14-6/.

I det tredje femårs-programmet, som nu avslutas har tyngdpunkten förskjutits mot tillämpning och provning av olika rivningsmetoder under verkliga förhållanden. Sålunda ingår fyra rivningsprojekt i programmet, näm-

ligen reaktorerna Windscale AGR (Storbritannien), Gundremmingen A (Tyskland) och BR-3 (Belgien), samt uppberedningsanläggningen AT-1 (Frankrike). Inför det fjärde programmet har man inom EU konstaterat att rivningsverksamheten är en mogen teknik och kan baseras på kommersiellt tillgänglig teknologi. Omfattningen av forskningsinsatserna har därför minskats betydligt.

IAEA

Inom IAEA pågår arbeten, som syftar till att dels sammanställa kunskapsläget inom olika tekniska delområden, dels ta fram rekommendationer och råd inför kommande tillståndsansökningar för rivning.

Inom IAEA finns även ett koordinerat FoU-program inom rivningsområdet. SKB har deltagit i detta program med studien av hantering av hel reaktortank.

Exempel från några länder

I USA pågår rivning av ett flertal kommersiella reaktorer, t ex Trojan, Rancho Seco, Maine Yankee och Fort St Vrain. Genomgående för dessa projekt är att de bedrivs i relativt långsam takt, bland annat beroende på bristande tillgång till slutförvarskapacitet.

I Tyskland rivs för närvarande Gundremmingen A, Kahl och ett antal mindre reaktorer. Vidare pågår planering för att riva de fyra reaktorerna vid Greifswald. Några reaktorer, t ex Lingen har placerats i stadium 2 för senare rivning.

I Frankrike har alla Magnoxreaktorerna, samt två vattenkylda reaktorer tagits ur drift och skall överföras till stadium 2. Av demonstrationsskäl diskuteras att en reaktor skall rivas helt inom kort.

Även i England har de flesta Magnoxreaktorerna tagits ur drift. Arbeta för att överföra dem till stadium 2 pågår. Rivningen planeras ske först om ca 100 år.

14.4 FORSKNINGSPROGRAM 1996 – 2001

Tidplanen för att genomföra behövligt FoU-arbete inom rivningsområdet är nära förknippad med tidplanen för rivningen av kärnkraftverken. Som framgått ovan kommer den första rivningen inte att påbörjas förrän tidigast några år efter 2010.

Några år innan den planerade rivningstidpunkten kommer en projektgrupp att organiseras för att i detalj planera rivningsarbetet. Till denna tidpunkt skall nödvändigt underlag beträffande rivningsmetoder, klassning av avfall, transportsystem mm finnas tillgängligt.

Huvuddelen av de metoder som behövs finns redan tillgängliga och utnyttjas i Sverige. I samband med planeringen av rivningen kommer de att anpassas till detta arbete. För en del utrustning kommer utvecklingsinsatser behövas. Då mycket utvecklingsarbete nu görs utomlands är det inte motiverat att starta några om-

fattande svenska utvecklingsarbeten under den kommande sexårsperioden.

Genomförda studier av rivning av svenska kärnkraftverk har visat på några områden där det är motiverat med tidiga insatser. De viktigaste är

- studie av möjligheten att ta hand om en hel reaktortank (se ovan),
- transporter och slutförvaring av andra stora komponenter.
- teknik för sönderdelning av interna delar,
- teknik för rivning av biologiska skyddet,
- omhändertagande av kontaminerad asbestisolering,
- metoder och utrustning för aktivitetsmätning av avfallet för friklassning, eller enklare slutförvaring,
- dekontaminering för friklassning,
- volymreduktion av avfallet genom kompaktering eller smältning.

De viktigaste planerade insatserna för de närmaste åren innefattar att på ett systematiskt sätt följa upp och utnyttja de möjligheter som ges att dra erfarenheter från de reparations- och ombyggnadsarbeten som görs. För vissa större projekt, t ex renoveringen av Oskarshamn I och genomförda ånggeneratorbyten planeras separata studier.

Från genomförda ombyggnadsarbeten har en del stora komponenter uppstått som skall tas om hand som avfall. En systematisk genomgång av olika hanteringsätt för dessa pågår och tester av t ex transport och slutförvaring, alternativt dekontaminering och smältning planeras.

För övriga områden kommer främst uppföljning av verksamheten utomlands att ske. Under senare delen av

perioden kan det bli aktuellt att bearbeta de övriga områdena mera systematiskt. I samband därmed bör även en utvärdering göras av möjligheten att göra försök i den nedlagda Ågestareaktorn.

Den uppföljande verksamheten avses som tidigare ske genom programkoordineringsfunktionen inom OECD / NEA-programmet, samt genom deltagande i IAEA-arbetet m m.

Vid rivningsarbetet erhålles en stor mängd lätt kontaminerat material, vilket skulle kunna friklassas, eventuellt efter en dekontaminering. Vissa erfarenheter finns från friklassning från kärnkraftverken. De låga friklassningsgränserna gör dock mätning och klassificering mycket arbetskrävande. Innan rivningen påbörjas är det väsentligt att regler och metoder för friklassning utvecklas så att detta kan göras rutinmässigt. Av stor vikt är därvid möjligheterna att mäta låga aktivitetsnivåer.

Inför rivning av kärnkraftverken måste även slutförvaret för rivningsavfall, SFR 3, stå färdigt. Då avfallet från rivning i flera avseenden är likvärdigt med en del avfall från driftperioden kan erfarenheter från SFR 1 ligga till grund för utformningen av SFR 3. Detta finns beskrivet i /14-7/. Tiden från förprojektering till färdig anläggning har beräknats till ca 7 år, vilket innebär att detta arbete inte kommer att påbörjas förrän en bit in på 2000-talet.

För att rivningsarbetet skall kunna genomföras på ett effektivt sätt är det väsentligt att även en del administrativa frågeställningar klargörs, t ex vilken form av tillstånd behövs och vilken redovisning till myndigheterna krävs härför. Detta arbete ligger inom myndigheternas ansvarsområde.

15 PROGRAMMETS GENOMFÖRANDE – OSÄKERHETER I TIDSPLANEN; KOSTNADER

I detta kapitel ges några kommentarer till hur programmet avses bli genomfört, några osäkerheter som finns särskilt beträffande tidsplanen samt en uppskattning av kostnader för de närmaste åren arbete. I anslutning till detta ges även en kort sammanfattning av kostnader för de FoU-arbeten som genomförts inom tidigare program.

15.1 GENOMFÖRANDE

Organisationen inom SKB har anpassats till den inriktning av programmet som presenterades i FUD-program 92 och som är grunden för det här redovisade programmet. SKB är organiserat i tre huvudenheter – Anläggningar, Djupförvar och Utveckling. Arbetet med projektering och lokalisering av en inkapslingsanläggning hålls samman av ett särskilt projekt inom enheten Anläggningar. Enheten Djupförvar svarar för lokalisering och projektering av djupförvaret. Enheten Utveckling svarar för stödjande FoU, för drift och FUD vid Äspölaboratoriet, för FoU kring alternativa metoder samt i samråd med anläggningsprojekten för arbeten med analyser av förvarets långsiktiga säkerhet.

SKBs egen stab för genomförande av programmet är relativt begränsad. Den är huvudsakligen koncentrerad till resurser för ledning, planering och uppföljning av arbetet. Därutöver har SKB en egen stab för genomförande av centrala delar av analyser av förvarets långsiktiga säkerhet. Arbeten för FoU drivs i samarbete med universitet, högskolor, konsultföretag och enskilda experter i Sverige och utomlands. Projekterings-, konstruktions- och anläggningsarbeten läggs ut på konsult-, ingenjörs- och entreprenadföretag. För större arbeten tillämpas normalt anbuds- och upphandlingsförfarande. En förteckning över de institutioner och företag som medverkat i SKBs arbeten redovisas i SKB Annual Report /15-1/. Se även Bilaga 1.

En viktig del för upprätthållande av hög kvalitet i arbetet är det internationella samarbetet. Detta drivs i olika former och är mycket omfattande. Särskilt bör här nämnas att nio utländska organisationer från åtta länder finns medverkar i FoU-arbeten vid Äspölaboratoriet. Flerparten av projekten kring naturliga analogier bedrivs i bred internationell samverkan. SKB medverkar på olika sätt i ett antal EU-projekt. Representanter från SKB deltar i kommittéer och arbetsgrupper på kärnavfallsområdet inom OECD/NEA och inom IAEA.

15.2 OSÄKERHETER I TIDSPLANEN

En måltidpunkt angiven i programmet är att kunna inleda deponeringen av inkapslat kärnbränsle år 2008. De tidsplaner som presenteras i kapitel 7 och 9 m.fl. tar främst hänsyn till tekniska aktiviteter vilka är relativt enkla att tidssätta. Det framgår av bl.a. kapitel 9 att lokaliseringen i praktiken till stor del styrs av samhällsliga och politiska faktorer vars inverkan på tidsplanen är svåra att bedöma. Nedan ges en översiktlig bedömning av osäkerheter i tidsplanerna och vad dessa kan medföra i form av förseningar eller tidigareläggningar.

En allmän tidsstyrande faktor är att resultat från forskningen vid Äspölaboratoriet och i övrigt måste hålla jämn takt med behoven inom inkapslings- och djupförvarsprojekten. Exempelvis måste erfarenheter från Äspölaboratoriets förundersökningar vara utvärderade för att kunna beaktas i djupförvarets platsundersökningsprogram.

15.2.1 Djupförvarets lokalisering

Djupförvarets lokalisering är en kontroversiell fråga som väcker intresse hos vissa och oro hos andra. Debatten kan ge upphov till tvära kast i hur lokala politiker uppfattar en lokalisering till sin kommun. Oron bland befolkningen i berörd kommun och utefter det använda bränslets transportväg måste mötas med saklig information och genom att bedriva lokaliseringsprocessen under stor öppenhet. Det måste finnas tid för människor i berörda kommuner att smälta tanken på ett djupförvar och ta till sig den information som finns. Hur snabbt lokaliseringsprocessen framskrider i praktiken är därför till stor del beroende av i vilken takt den kan genomföras ur samhällslig och politisk synpunkt. Hur lång tid denna process tar är svår att uppskatta. I tidsplanen förutses att förstudierna kan genomföras rationellt sett ur teknisk synpunkt och att platsundersökningar kan starta vid årsskiftet 1996/97.

Om ytterligare förstudier skulle tillkomma sent under 1996 kan platsundersökningarna förskjutas med något år. Sannantaget framstår tidpunkten för start av platsundersökningar som tidskritisk för hela lokaliseringsprogrammet.

Platsundersökningar beräknas ta 4-5 år att genomföra. Tidsstyrande är omfattningen på undersökningarna som

i sin tur påverkas av säkerhets- och funktionskrav liksom av lokala förhållanden. Exempelvis beror tidsplanen på tillgång till befintliga data vid undersökningarnas inledning. Det kan ta något år extra att undersöka en plats där modern geologisk kartläggning saknas. Om undersökningarna i stället görs på en tidigare välundersökt plats, exempelvis ett av SKBs typområden, kan å andra sidan undersökningstiden förkortas med något år.

Lokaliseringsetappen avslutas med att SKB ansöker om tillstånd att få detaljundersöka något av de undersökta områdena. Enligt regeringsbeslutet från maj 1995 /15-2/ är en detaljundersökning att betrakta som en del i uppförandet av en kärnteknisk anläggning. Lokaliseringen måste därför prövas enligt både naturresurslagen och kärntekniklagen. Faller prövningen väl ut erhålles koncession för uppförande av kärnteknisk anläggning.

Myndighetsgranskning fram till ett regeringsbeslut avseende tillstånd till detaljundersökning har i tidsplanen bedömts till drygt ett år. Härvid beaktas att den omfattande MKB-process som har föregått ansökan har medfört att underlaget till ansökan är väl känt redan i förväg för samtliga berörda.

Sammantaget är det realistiskt att anta att djupförvarets lokalisering kan avgöras ett par år efter sekelskiftet. Detta förutsätter dock att platsundersökningar kan starta omkring årsskiftet 1996/97. Exempel på händelser som kan åstadkomma en avsevärd försening av tidsplanen är tex att förstudier och platsundersökningar blir fördröjda av politiska skäl, att det krävs fler platsundersökningar än planerat p g a att de första inte visar tillräckligt bra förhållanden eller att beslutsprocessen för erforderliga myndighetstillstånd drar ut på tiden.

15.2.2 Inkapslingsanläggning

För inkapslingsanläggningen har lokaliseringsarbetet kommit längre. Arbete pågår att ta fram underlag till en miljökonsekvensbeskrivning för en lokalisering vid CLAB. Detta arbete bedrivs bl a i samråd med Oskarshamns kommun och länsstyrelsen i Kalmar län. De största osäkerheterna beträffande tidsplanen för inkapslingsanläggningen ligger i kopplingen till djupförvarets lokalisering. Inför beslutet om inkapslingsanläggningen bör lokaliseringen av djupförvaret ha framskridit så långt att det är sannolikt att deponering av kapslar kan påbörjas snarast efter att inkapslingsanläggningen har tagits i drift. Förseningar i djupförvarsprojektet kan därvid komma att påverka tidpunkten för beslut om att bygga inkapslingsanläggningen.

De viktigaste tekniska osäkerheterna i inkapslingsprojektet är kopplade till val av metod för tillverkning av kopparkapsel, samt för förslutning och kontroll av kapseln. Innan ansökan om att få bygga inkapslingsanläggningen lämnas skall SKB visa att det finns en lämplig metod att serietillverka kapslar, samt genomföra omfat-

tande prov av förslutningen. Problem inom dessa områden kan innebära förseningar på något år.

När väl beslut om att uppföra anläggningen fattats bedöms tiden för att bygga och driftsätta anläggningen till ca 7,5 år. Osäkerheten i denna uppskattning bedöms vara mindre än ett år.

15.2.3 Detaljundersökning inför inledande drift m m

En detaljundersökning innebär att tunnlar och/eller schakt drivs ner till förvarsdjup och olika typer av berggrundsundersökningar genomförs. I anslutning därtill byggs ovanjordsanläggningarna med tillhörande vägsystem och/eller järnväg. Etappen avslutas med en ansökan om drifttillstånd. Denna ansökan innehåller bl a en uppdaterad säkerhetsrapport baserad på de resultat som framkommit under detaljundersökningen och en slutlig säkerhetsrapport för den inledande driften.

När regeringen och kommunen givit sitt godkännande till djupförvarets lokalisering kan man förvänta sig att tidsåtgången för de fortsatta arbetena huvudsakligen styrs av tekniska faktorer. I tidsplanen har 5-6 år beräknats för detaljundersökningen som omfattar schakt/tunnel till förvarsdjup, tillredning av alla bergrum i underjordsanläggningens centraldel samt detaljerad undersökning av förvarsområdet för den inledande driften.

En period av 4 år krävs i normalfallet för ovanjordsanläggningar och anslutande väg/järnväg. Även om en väsentligt större utbyggnad skulle vara nödvändig, exempelvis genom behov av flera mil anslutande järnväg, bör denna kunna inrymmas i de 5-6 år som tidsplanen anger. Detta kräver emellertid att beslut om utbyggnad fattas i etappens inledning. Skulle beslutet dröja kan etappen försenas med flera år. Å andra sidan kan ett tidigt beslut om utbyggnad tillsammans med okomplicerade geologiska förhållanden och rationell undersökningsmetodik medföra att etappen kan förkortas med något år.

15.3 KOSTNADER OCH PRIORITERINGAR

Kostnaderna för genomförande av SKBs program redovisas årligen i en PLAN-rapport /15-3/. Dessa kostnader skall inte närmare redovisas här. Vid bedömningen av programmet kan det dock vara av visst intresse att få en uppfattning om hur stora kostnader och vilken prioritering av FUD-arbetet som bedöms aktuell. Prioriteringar förändras fortlöpande allteftersom resultat kommer fram och det är vanskligt att göra en säker bedömning för varje enskilt område under en längre period. Liksom i föregående program lämnas en grov preliminär bedömning av kostnaderna för den närmaste sex-årsperioden.

Tabell 15-1 innehåller en preliminär kostnadsbedömning för de program som beskrivs i kapitel 7 och 9 för inkapslingsanläggningen resp djupförvaret.

Tabell 15-2 innehåller en preliminär kostnadsbedömning för de program som beskrivs i kapitel 11-14 för stödjande FoU, Äspölaboratoriet, annat avfall, alternativa metoder och rivningsstudier.

Tabell 15-1. Preliminär bedömning av kostnader för inkapslingsanläggning och djupförvar – MSEK, penningvärde augusti 1995.

År	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Inkapslingsanläggning	90	90	80	80	150	180
Djupförvar	110	150	180	230	180	130

Tabell 15-2. Preliminär bedömning av kostnader för FoU-arbeten åren 1996-2001.

År	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Stödjande FoU	50	48	46	44	42	40
Äspölaboratoriet	60	60	70	70	50	50
Annat Avfall inkl SFR	5	5	5	5	5	5
Alternativa metoder	3	3	3	3	3	3
Rivning	1	1	1	1	1	1

Tabell 15-3 ger en ungefärlig procentuell fördelning av kostnaderna för stödjande FoU uppdelad på de olika ämnesområdena.

Tabell 15-3. Ungefärlig procentuell fördelning av kostnader för stödjande FoU 1996-2001.

	Andel %
Säkerhetsanalysmetoder	14
Bränsle	31
Övrigt material	10
Geovetenskap	21
Kemi	12
Naturliga analogier	8
Biosfär	4

En indikation på precisionen i ovanstående bedömningar kan måhända vara kostnadsutfallet jämfört med tidigare bedömningar för FoU-programmen 86 och 89.

I FoU-program 86 /15-4/ uppskattades kostnaderna för programperioden 1987-1992 till ca 600 MSEK i penningvärde aug 1986. Därav angavs 175 MSEK vara bedömd kostnad för det som sedermera blev Äspölaboratoriet. Faktiskt förbrukade medel för programmet uppgick för samma period till ca 900 MSEK i löpande penningvärde eller ca 695 MSEK omräknad till penningvärde i augusti 1986. (Häri ingår ca 80 MSEK i utländska bidrag till Stripa-projektets fas 3.) Kostnaderna för Äspö var under perioden ca 215 MSEK i penningvärde aug 86. Under sexårsperioden 1987-1992 var således kostnaderna för Äspö något högre och för övrig FUD något lägre än vad som bedömdes vid programperiodens början. Utfallet totalt sett är ungefär enligt ursprunglig bedömning, som ej innehöll utländsk andel i Stripa.

I anslutning till FoU-program 89 /15-5/ uppskattades kostnaderna för programperioden 1990-1995 till ca 760 MSEK i penningvärde aug 1989. Faktiska utfallet väntas bli ca 1040 MSEK i löpande penningvärde eller ca 840 MSEK i penningvärde aug 1989. (Även här ingår kostnader för utländskt deltagande i Stripa och Äspö med sammanlagt ca 67 MSEK). Kostnaderna för Äspö är under denna period ca 500 MSEK (varav ca 280 MSEK är anläggningskostnad) i löpande penningvärde eller ca 400 MSEK i penningvärde 1989. För programperioden 1990-1995 synes utfallet totalt sett bli ungefär enligt bedömningen vid periodens början. (Projektkostnaderna för inkapslingsanläggning och djupförvar som påbörjades 1993 ingår ej i dessa värden då dessa ej fanns med i 1989 års program).

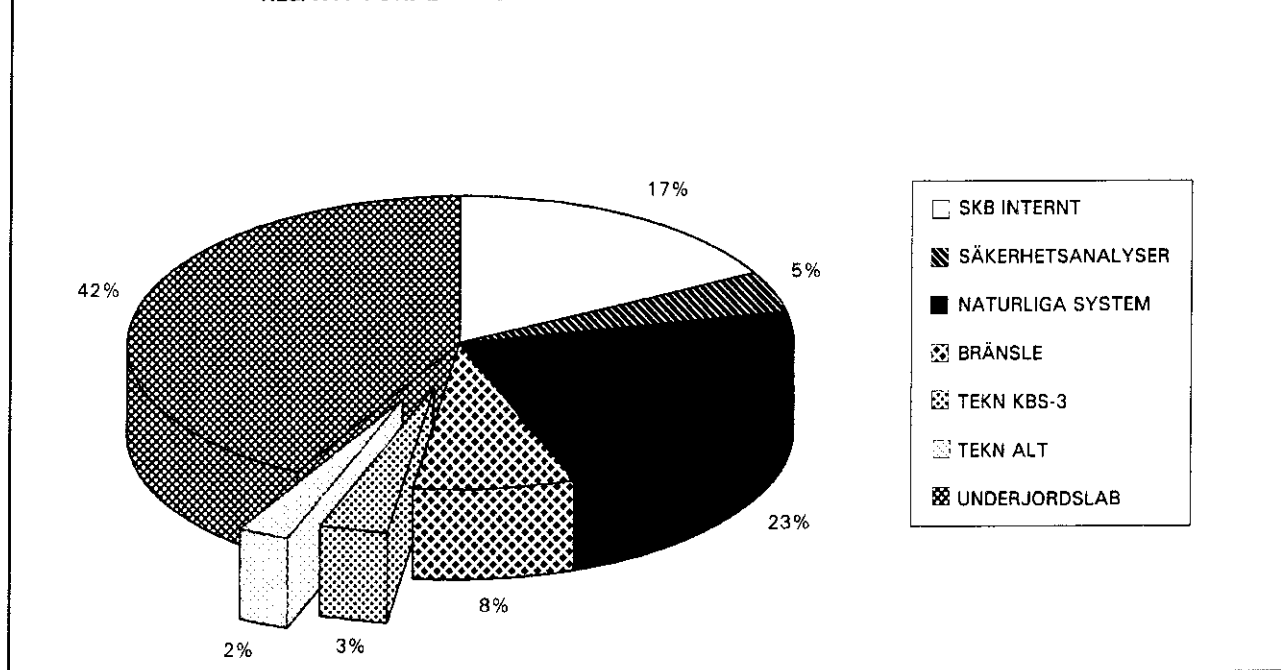
Det kan även vara av intresse att belysa fördelningen av faktiska utfallet av FoU-kostnaderna.

Figur 15-1 ger en sammanfattning av den relativa fördelningen av FoU-kostnader inom SKBs program inkl internationella projekt ledda av SKB under perioden 1987-1995, d v s de två överlappande sexårsperioder som ingick i 1986 och 1989 års program.

De FoU-arbeten som genomförts avseende säkerhetsanalyser och naturliga system har gett en generell kunskap som är tillämplig för djupförvaring i svenskt urberg av olika avfallsformer. Detsamma gäller övervägande delen av insatserna vid Stripa, Äspö och URL. Endast en begränsad del av Stripa-arbetena var specifikt inriktade på KBS-3. Arbetena på bränsle är till övervägande del tillämpliga på djupförvaring av ej upparbetat kärnbränsle i svenskt urberg och endast i vissa delar specifika för KBS-3.

Slutsatsen är att övervägande delen av de FoU-insatser som gjorts under perioden 1987 - 1995 gällt arbeten som är generellt tillämpliga på djupförvaring av använt kärnbränsle i svenskt urberg – jfr avsnitt 3.1.2. Endast en begränsad del har gällt specifika metoder som KBS-3 m fl.

RELATIV FÖRDELNING AV FOU-KOSTNADER 1987-1995



Figur 15-1. Relativ fördelning av FoU-kostnader under perioden 1987-1995.

I figuren har kostnadsutfallet grupperats i följande grupper:

- **SKB internt =**
löner, lokaler, resor m m för den personal inom SKB som engageras i programmet samt datorer och dokumentation,
- **Säkerhetsanalyser=**
ext kostn för utv och genomförande av säkerhetsanalyser,
- **Naturliga system=**
ext FoU-kostn för geovetenskap, naturliga analogier, kemi, biosfär, instrumentutveckling men exkl Stripa och Äspö,
- **Bränsle=**
ext FoU-kostn för undersökningar av använt bränsle,
- **Teknik KBS-3=**
ext FoU-kostn direkt hänförliga till KBS-3 konceptet d v s kapsel, buffert och utformning,
- **Teknik Alt=**
ext FoU-kostn hänförlig till andra koncept än KBS-3 inkl alternativa behandlingsmetoder,
- **Underjordslab=**
kostn för Stripa, Äspö och SKBs medverkan i URL, Kanada; anl kostnad Äspö ej medräknad.

REFERENSER

Kapitel 1 – Inledning, bakgrund

- 1-1 FoU-program 86, Del I-III. Kärnkraftavfallets behandling och slutförvaring. Program för forskning, utveckling och övriga åtgärder.**
SKB, Stockholm, september 1986.
- 1-2 FoU-program 89, Del I-II. Kärnkraftavfallets behandling och slutförvaring. Program för forskning, utveckling och övriga åtgärder.**
SKB, Stockholm, september 1989.
- 1-3 FUD-program 92. Kärnkraftavfallets behandling och slutförvaring. Program för forskning, utveckling, demonstration och övriga åtgärder.**
Rapport med tre underlagsrapporter.
SKB, Stockholm, september 1992.
- 1-4 Disposal of high level radioactive waste. Consideration of some basic criteria.**
The Radiation Protection and Nuclear Safety Authorities in Denmark, Finland, Norway and Sweden, 1993. (Finns även i svensk översättning.)
- 1-5 IAEA Safety standards. Safety principles and technical criteria for the underground disposal of high level radioactive waste.**
IAEA Safety series no 99, Vienna 1989.
- 1-6 Lag om kärnteknisk verksamhet.**
SFS 1984:3, 1984-01-24.
Ändrad SFS 1995:875, 1995-06-15.
- 1-7 Förordning om kärnteknisk verksamhet.**
SFS 1984:14 1984-01-31.
Ändrad SFS 1995:153, 1995-02-02.
- 1-8 Använt kärnbränsle och radioaktivt avfall. Betänkande av Aka-utredningen.**
SOU 1976:30 Del I, SOU 1976:31 Del II, SOU 1976:41 Bilaga.
- 1-9 Kärnbränslecykelns slutsteg. Förglasat avfall från upparbetning. Del I-V. Projekt Kärnbränslesäkerhet.**
SKBF/KBS, Stockholm, november 1977.
- 1-10 Kärnbränslecykelns slutsteg. Slutförvaring av använt kärnbränsle. Del I-II. Projekt Kärnbränslesäkerhet.**
SKBF/KBS, Stockholm, september 1978.
- 1-11 Lag om finansiering av framtida utgifter för använt kärnbränsle m m.**
SFS 1981:669.
Ersatt av SFS 1992:1537, 1992-12-30.
- 1-12 Kärnbränslecykelns slutsteg. Använt kärnbränsle KBS-3. Del I-IV.**
SKBF/KBS, Stockholm, maj 1983.
- 1-13 Kärnbränslecykelns slutsteg. Använt kärnbränsle KBS-3. Program för forskning och utveckling.**
SKBF/KBS, Stockholm, februari 1984.
- 1-14 SKB Annual Report 1992.**
SKB Technical Report TR 92-46, Stockholm, May 1993.
- 1-15 SKB Annual Report 1993.**
SKB Technical Report TR 93-34, Stockholm, May 1994.
- 1-16 SKB Annual Report 1994.**
SKB Technical Report TR 94-33, Stockholm, May 1995.
- 1-17 SKI – SKIs utvärdering av SKBs FUD-program 92.**
Sammanfattning och Slutsatser SKI TR 93:13
Gransknings-PM SKI TR 93:14
Sammanställning av remissvar SKI TR 93:15
SKI Mars 1993.
- 1-18 Slutförvaring av använt kärnbränsle.**
KASAM yttrande över SKBs FUD-program 92
SOU 1993:67, KASAM 1993.
- 1-19 Miljö- och naturresursdepartementet – Regeringsbeslut 40. Program för forskning m m angående kärnkraftsavfallets behandling och slutförvaring.**
1993-12-16.

Kapitel 3 – Stegvis utveckling och utbyggnad

1-20 FUD-program 92, Kompletterande redovisning. Kärnkraftavfallens behandling och slutförvaring. Komplettering till 1992 års program sammanställt med anledning av regeringsbeslut 1993-12-16.

SKB, Stockholm, augusti 1994.

1-21 SKI – SKIs yttrande över SKBs kompletterande redovisning till FUD-program 92.

SKI Rapport 95:1, SKI januari 1995.

1-22 Miljödepartementet – Regeringsbeslut 11. Komplettering av program för forskning m m angående kärnkraftsavfallens behandling och slutförvaring m m.

1995-05-18.

1-23 SKB, Kärnkraftens slutsteg PLAN 95. Kostnader för kärnkraftens radioaktiva restprodukter.

SKB, Stockholm, juni 1995.

Kapitel 2 – Mål för programmet

2-1 Se 1-20

2-2 Se 1-6

2-3 Se 1-17

2-4 Se 1-18

2-5 Se 1-19

2-6 Se 1-12

2-7 Se 1-23

2-8 Pettersson S, Svemar C

Kortfattad preliminär anläggningsbeskrivning.

SKB Djupförvar Arbetsrapport AR 44-93-008, Stockholm, 1993.

3-1 Se 1-8

3-2 Lag om särskilt tillstånd att tillföra kärnreaktor kärnbränsle m m .

SFS 1977:140, 21 april 1977.

3-3 Se 1-1

3-4 Se 1-6

3-5 Se 1-9

3-6 Se 1-12

3-7 WP-Cave – Assessment of feasibility, safety and development potential.

SKB Technical Report TR 89-20, Stockholm, September 1989.

3-8 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.

3-9 Juhlin C, Sandstedt H

Storage of nuclear waste in very deep boreholes.

SKB Technical Report TR 89-39, Stockholm, December 1989.

3-10 Projekt AlternativStudier för Slutförvar (PASS). Slutrapport.

SKB, Stockholm, september 1992.

3-11 Se 1-3

3-12 Extended storage of spent fuel.

Final report of a co-ordinated research programme on the behaviour of spent fuel and storage facility components during longterm storage (BEFAST-II, 1986-1991). IAEA-TECDOC-673.

Kapitel 4 – Djupförvaring – principer och krav

- 3-13 Brennelementlager Gorleben GmbH.**
Transportbehälterlager Gorleben – Sicherheitsbericht
Dezember 1992.
- 3-14 Vepco**
**Safety analysis report. Surry Power Station. Dry
cask independent spent fuel storage installation.**
Virginia Electric Power Company, October 1982.
- 3-15 Se 1-20**
- 3-16 Lag om hushållning med naturresurser m m.**
SFS 1987:12.
- 3-17 Technical appraisal of the current situation in
the field of radioactive waste management.**
A collective opinion of the NEA Radioactive Waste Ma-
nagement Committee.
OECD/NEA, Paris, 1985.
- 3-18 The environmental and ethical basis of geologi-
cal disposal.**
A collective opinion of the NEA Radioactive Waste Ma-
nagement Committee.
OECD/NEA, Paris, 1995.
- 3-19 Miljö- och Energidepartementet. Regeringsbe-
slut 28.**
**Program för forskning m m angående kärn-
kraftsavfallens behandling och slutförvaring.**
1987-11-26.
- 3-20 SKB, Kärnkraftens slutsteg.**
**Alternativa tidplaner för hantering av använt
bränsle. Konsekvenser för planering, säkerhet
och kostnader.**
SKB, Stockholm, december 1985.
- 3-21 Se 1-22**
- 3-22 Thegerström C, Forsström H**
SKB:s planering av MKB-processen i samband med slut-
förvaring av kärnavfall.
KASAM seminarium "Miljökonsekvensbeskrivningen
(MKB) och dess roll i beslutsprocessen", Luleå, 1994-10-
24-26.
- 4-1 Se 1-3**
- 4-2 SKB**
Förstudie Storuman – Slutrapport.
SKB, Stockholm, januari 1995
- 4-3 Se 1-19**
- 4-4 Se 1-20**
- 4-5 Se 1-22**
- 4-6 SKB**
**Översiktsstudie 95 – Lokalisering av djupförvar
för använt kärnbränsle.**
SKB, Stockholm, september 1995.
- 4-7 Strålskyddslagen.**
SFS 1988:220. (Se även Lars Persson: Strålskyddslagen
med kommentarer. Publica 1989).
- 4-8 ICRP, Recommendations of the ICRP .**
ICRP Publ 60, Annals of the ICRP 21 (1991).
- 4-9 Se 1-4**
- 4-10 Statens Strålskyddsinstitut, Kärnenergienhe-
ten.**
Statens Strålskyddsinstituts skyddskriterier för omhänder-
tagande av använt kärnbränsle.
SSI-rapport 95-02, 1995.
- 4-11 SR 95.**
Mall för säkerhetsrapporter med beskrivande exempel.
SKB, Stockholm, 1995.

Kapitel 5 – Kunskapsläge – långsiktig säkerhet

Avsnitt 5.1 – METODER FÖR SÄKERHETSANALYS

5.1-1 Safety assessments of radioactive waste repositories.

Proceedings of the October 1989 Paris Symposium, OECD/NEA, IAEA, CEC, Paris, 1990.

5.1-2 Disposal of radioactive waste. Can long term safety be evaluated.

An international collective opinion, OECD/NEA, Paris 1991.

5.1-3 Se 4-11

5.1-4 The role of conceptual models in demonstrating repository post-closure safety.

Proceedings of a NEA Workshop, Paris 16-18, November, 1993.

Avsnitt 5.2 – SCENARIER

5.2-1 Systematic approaches to scenario development.

A report of the NEA Working Group on the identification and selection of scenarios for performance assessment of radioactive waste disposal.

OECD/NEA, Paris, 1992.

5.2-2 Risks associated with human intrusion at radioactive waste disposal sites.

Proceedings of a NEA Workshop, OECD/NEA, Paris, 1989.

5.2-3 Conservation and retrieval of information.

Nordiske Seminar- og Arbeidsrapporter 1993: 596; Final report of the Nordic Nuclear Safety Research Project, KAN-1.3, 1993.

5.2-4 Andersson J (ed. and author), Carlsson T, Eng T, Kautsky F, Söderman E, Wingefors S

The joint SKI/SKB scenario development project.

SKB Technical Report TR 89-35, Stockholm, December 1989.

5.2-5 Skagius K, Wiborgh, M

Testing of influence diagrams as a tool for scenario development by application on the SFL 3-5 repository concept. SKB Arbetsrapport AR 94-47 Vol. 1 and 2, Stockholm, September 1994.

5.2-6 Stephansson O, Hudson, J A

SKI/SKB FEPs identification and characterization via the 'Rock Engineering Systems' approach.

SKB Arbetsrapport AR 93-36, Stockholm, August 1993.

5.2-7 Eng T, Hudson J, Stephansson O, Skagius K, Wiborgh M

Scenario development methodologies.

SKB Technical Report TR 94-28, Stockholm, November 1994.

Avsnitt 5.3 – ANVÄNT BRÄNSLE

5.3-1 Forsyth R S, Werme L O

Spent fuel corrosion and dissolution.

J. Nucl. Mat. Vol. 190, pp. 3-19, 1992.

5.3-2 Werme L, Sellin P, Forsyth R

Radiolytically induced oxidative dissolution of spent nuclear fuel.

SKB Technical Report TR 90-08, Stockholm, 1990.

5.3-3 Johnson L H, LeNeveu D M, Shoesmith D W, Oscarson D W, Gray M N, Lemire R J, Garisto N C

The disposal of Canada's nuclear fuel waste: The vault model for postclosure assessment.

AECL Research Report AECL-10714, COG-93-4, Whiteshell, 1994.

5.3-4 Forsyth R S

Determination of fission product concentrations by means of ICP-MS: Status report on development of a spreadsheet correction and evaluation programme.

SKB Arbetsrapport AR 92-65, Stockholm, 1992.

5.3-5 Forsyth R S, Eklund U-B

Spent nuclear fuel corrosion: The application of ICP-MS to direct actinide analysis.

SKB Technical Report TR 95-04, Stockholm, 1995.

- 5.3-6 Forsyth R S**
Spent nuclear fuel. A review of properties of possible relevance to corrosion processes.
SKB Technical Report (i manuskript), Stockholm, 1995.
- 5.3-7 Grambow B, Forsyth R S, Werme L O, Bruno J**
Fission product release from spent UO₂ fuel under uranium saturated oxic conditions.
Nuclear Technology, Vol.92, pp. 204-213, 1990.
- 5.3-8 Forsyth R S, Mattsson O, Schrire D**
Fission product concentration profiles (Sr, Xe, Cs and Nd) at the individual grain level in power ramped LWR fuel.
SKB Technical Report TR 88-24, Stockholm, 1988.
- 5.3-9 Garisto N C, Johnson L H, Hocking W H**
Proc. Second Int. Conf. on CANDU fuel, Chalk River, Ontario, Canada, Oct. 1-5, 1989 (Hastings IJ, Ed.) p. 352, 1990.
- 5.3-10 Hocking W H, Gerwing A F, Vasyvwich K M, Frost C R**
Proc. Second Int. Conf. on CANDU fuel, Chalk River, Ontario, Canada, Oct. 1-5, 1989(Hastings IJ, Ed.) p. 369
- 5.3-11 Forsyth R S, Eklund U-B, Werme L O**
A study of fission product migration and selective leaching by means of a power bump test.
Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol 333, pp 385-390, 1994.
- 5.3-12 Skålberg M, Eliasson L, Skarnemark G, Torstenfelt B, Forsyth R, Holmer A, Allard B**
Diffusion of radionuclides from spent oxide fuel into compacted bentonite.
Sci. Total Environ. Vol. 69, p. 347, 1988.
- 5.3-13 Albinsson Y, Forsyth R, Skarnemark G, Skålberg M, Torstenfelt, Werme L O**
Leaching/migration of UO₂ fuel in compacted bentonite.
Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol 176, p. 559, 1990.
- 5.3-14 Ramebäck H, Albinsson Y, Skålberg M, Werme L O**
Release and diffusion of ⁹⁰Sr from spent UO₂ fuel in bentonite clay.
Radiochimica Acta, Vol. 66/67, p 475, 1994.
- 5.3-15 Bruno J, Casas I, Cera E, De Pablo J, Giménez J, Torrero M E**
Uranium (IV) dioxide and SIMFUEL as chemical analogues of nuclear spent fuel matrix dissolution. A comparison of dissolution results in a standard NaCl/NaHCO₃ solution.
Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 353, p. 601, 1995.
- 5.3-16 Janeczczek J, Ewing R C**
Oxidation of uraninite.
SKB Technical Report TR 93-17, Stockholm, 1993.
- 5.3-17 Thomas L E, Eizinger R E, Buchanan H C**
Effect of fission products on air-oxidation of LWR spent fuel.
J.Nucl. Mater., Vol 201, p 310, 1993.
- 5.3-18 Casas I, Bruno J, Cera E, Finch R, Ewing R C**
Kinetic and thermodynamic studies on uranium minerals: Assessment of long-term evolution of spent nuclear fuel.
SKB Technical Report TR 94-16, Stockholm, 1994.
- 5.3-19 Eriksen T E, Eklund U-B, Werme L, Bruno J**
Dissolution of irradiated fuel. A radiolytic mass balance study.
Accepted for publication in J. Nucl. Mater.
- 5.3-20 Shoesmith D W, Sunder S, Bailey M G, Miller N H**
Corrosion of used nuclear fuel in aqueous perchlorate and carbonate solutions.
Accepted for publication in J. Nucl. Mater.
- 5.3-21 Tremaine P R, Chen J O, Wallace G J, Biovin W A**
Solubility of uranium(IV) oxide in alkaline aqueous solution to 300°C.
J. Solution Chem., Vol. 8, p. 221, 1991.
- 5.3-22 Casas I, Bruno J, Cera E, Duro L, Sandino A, Ollila K, Eklund U-B, Werme L**
Static and dynamic SIMFUEL leaching studies.
SKB Technical Report (i manuskript), Stockholm, 1995.
- 5.3-23 Gray W J, Strachap D M**
UO₂ matrix dissolution rates and grain boundary inventories of Cs, Sr and Tc in spent LWR fuel.
Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 212, p. 205, 1991.

Avsnitt 5.4 – BUFFERT OCH ÅTERFYLLNING

5.4-1 Pusch R, Börgesson L, Nilsson J

Buffer Mass Test – buffer materials.

Stripa Project Technical Report TR 82-06, SKB, Stockholm, 1982.

5.4-2 Pusch R, Börgesson L

PASS – Project on Alternative Systems Study. Performance assessment of bentonite clay barrier in three repository concepts; VDH, KBS-3 and VLH.

SKB Technical Report TR 92-40, Stockholm, 1992.

5.4-3 Pusch R

Required properties of the rock for acceptable long-term nearfield performance.

SKB Arbetsrapport (i manuskript), Stockholm, 1995.

5.4-4 Börgesson L, Pusch R, Fredriksson A, Hökmark H, Karnland O, Sandén T

Final report of the rock sealing project – Sealing of the near-field rock around deposition holes by use of bentonite grouts.

Stripa Project Technical Report TR 91-34, SKB, Stockholm, 1991.

5.4.5 Pusch R et al.

The buffer and backfill encyclopedia, Part I: Definitions, basic relationships, and laboratory methods.

Clay Technology AB, Lund, 1994.

5.4-6 Pusch R, Karnland O, Hökmark H

GMM – A general microstructural model for quantitative and quantitative studies of smectite clays.

SKB Technical Report TR 90-43, Stockholm, 1990.

5.4-7 Pusch R

Evolution of models for conversion of smectite to non-expanding minerals.

SKB Technical Report TR 93-33, Stockholm, 1993.

5.4-8 Pusch R, Karnland O, Hökmark H, Sandén T, Börgesson L

Final report of the rock sealing project – Sealing properties and longevity of smectic clay grouts.

Stripa Project Technical Report TR 91-30, SKB, Stockholm, 1991.

5.4-9 Karnland O

Salt redistribution and enrichment in compacted bentonite exposed to a thermal gradient – Results from laboratory tests.

SKB Arbetsrapport (i manuskript), Stockholm, 1995.

5.4-10 Pusch R

Selection of buffer materials with special respect to their performance in a long-term perspective.

SKB Arbetsrapport AR 95-21, Stockholm, 1995.

5.4-11 Karnland O, Pusch R

Smectite-to-illite conversion models. Factors of importance for KBS-3 conditions.

SKB Arbetsrapport (i manuskript), Stockholm, 1995.

5.4-12 Hökmark H

Smectite to illite conversion in bentonite buffers. Application of a technique for modelling degradation processes.

SKB Arbetsrapport AR 95-07, Stockholm, 1995.

5.4-13 Pusch R

Consequences of using crushed crystalline rock as ballast in KBS-3 tunnels instead of rounded quartz particles.

SKB Technical Report TR 95-14, Stockholm, 1995.

5.4-14 Börgesson L, Fredriksson A, Johannesson L-E

Heat conductivity of buffer materials.

SKB Technical Report TR 94-29, Stockholm, 1994.

5.4-15 Börgesson L

Modelling of the physical behaviour of water saturated clay barriers. Laboratory tests material models and finite element application.

SKB Technical Report (i manuskript), Stockholm, 1995.

5.4-16 Börgesson L

THM modelling of water unsaturated buffer materials.

SKB Arbetsrapport (i manuskript), Stockholm, 1995.

5.4-17 Börgesson L, Hernelid J

DECOVALEX Test case 3.

SKB Arbetsrapport AR 94-49, Stockholm June, 1994.

5.4-18 Börjesson L

Swelling and homogenisation of bentonite granules in buffer and backfill. Finite element modelling of the microstructural behaviour.

SKB Arbetsrapport AR 95-22, Stockholm, 1995.

5.4-19 Wikramaratna R S, Goodfield M, Rodwell W R, Nash P J, Agg P J

A preliminary assessment of gas migration from the Copper/Steel Canister.

SKB Technical Report TR 93-31, November, 1993.

5.4-20 Pusch R

Gas transport through smectitic clay and crystalline rock.

SKB Arbetsrapport Report AR 94-61, Stockholm, August, 1994.

5.4-21 Pedersen K, Karlsson F

Investigations of subterranean microorganisms. Their importance for performance assessment of radioactive waste disposal.

SKB Technical Report TR 95-10, Stockholm, 1995.

5.4-22 Lagerblad B, Trägård J

Conceptual model for concrete long time degradation in a deep nuclear waste repository.

SKB Technical Report (i manuskript), Stockholm, 1995.

Avsnitt 5.5 – BERGGRUNDEN

5.5-1 Ahlbom K et al.

Sternö Study Site. Scope of activities and main results.

SKB Technical Report TR 92-02, Stockholm, 1992.

5.5-2 Ahlbom K et al.

Kamlunge Study Site. Scope of activities and main results.

SKB Technical Report TR 92-15, Stockholm, 1992.

5.5-3 Ahlbom K et al.

Klipperås Study Site. Scope of activities and main results.

SKB Technical Report TR 92-22, Stockholm, 1992.

5.5-4 Ahlbom K et al.

Finnsjön Study site. Scope of activities and main results.

SKB Technical Report TR 92-33, Stockholm, 1992.

5.5-5 Ahlbom K et al.

Gideå Study Site. Scope of activities and main results.

SKB Technical Report TR 91-51, Stockholm, 1991.

5.5-6 Ahlbom K et al.

Fjällveden Study Site. Scope of activities and main results.

SKB Technical Report TR 91-52, Stockholm, 1991.

5.5-7 Ahlbom K, Leijon B, Liedholm M, Smellie J

Gabbro as a host rock for nuclear waste repository.

SKB Technical Report TR 92-25, Stockholm, 1992.

5.5-8 Leijon B

Geomechanical and rock engineering characteristics of gabbro.

SKB Djupförvar Projektrapport PR 44-92-001, Stockholm, 1991.

5.5-9 Smellie J

Gabbro: Geological and hydrogeochemical features.

SKB Djupförvar Projektrapport PR 44-92-003, Stockholm, 1992.

5.5-10 Liedholm M

The hydraulic properties of different greenstone areas.

SKB Djupförvar Projektrapport PR 44-92-007, Stockholm, 1992.

5.5-11 Ahlbom K

Gabbro as a host rock for a nuclear waste repository.

SKB Djupförvar Projektrapport PR 44-92-002, Stockholm, 1992.

5.5-12 Andreasson P-G, Rodhe A

The protogine zone geology and mobility during the last 1.5 Ga.

SKB Technical Report TR 92-21, Stockholm, 1992.

5.5-13 Wannäs K O, Flodén T

Tectonic framework of the Hanö Bay area, southern Baltic Sea.

SKB Technical Report TR 93-18, Stockholm, 1994.

5.5-14 Bruun Å, Kario L, Lundqvist T et al.

Geologiska miljöer och faktorer, sett i olika skalor, att beakta vid planering av ett slutförvar för använt kärnbränsle.

SKB Djupförvar Projektrapport PR 44-92-010, Stockholm, 1992.

- 5.5-15 Lidmar-Bergström K**
Berggrunders ytformer.
Sveriges Nationalatlas, Berg och jord, Stockholm, 1994.
- 5.5-16 Henkel H, Roslund M**
Första ordningens branta skjuvzoner i Sverige.
SKB Arbetsrapport AR 94-56, Stockholm, 1994.
- 5.5-17 Scholz C H**
The mechanics of earthquakes and faulting.
Cambridge University Press, 1990, Cambridge.
- 5.5-18 Röshoff K**
Generisk studie av sprickbildningsmekanismer. Kort om bildning, tillväxt och uppträdande. Delrapport nr 2.
SKB Arbetsrapport AR 94-27, Stockholm, 1994.
- 5.5-19 Mazurek M, Bossart P, Eliasson T**
Classification and characterization of water-conducting features at Äspö: Results of phase I investigations.
SKB Äspö HRL Progress Report 25-95-03, Stockholm, 1995.
- 5.5-20 Hudson J A (ed.)**
Comprehensive rock engineering.
Volume 1 Fundamentals, Pergamon Press, 1993.
- 5.5-21 Leijon B**
Mechanical properties of fracture zones.
SKB Technical Report TR 93-19, Stockholm, 1993.
- 5.5-22 Jing L et al.**
DECOVALEX – Mathematical models of coupled T-H-M processes for nuclear waste repositories. Report of phase I.
SKI Technical Report 93:31, Stockholm, 1993.
- 5.5-23 Jing L et al.**
DECOVALEX – Mathematical models of coupled T-H-M processes for nuclear waste repositories. Report of phase II.
SKI Technical Report 94:16, Stockholm, 1994.
- 5.5-24 Jing L et al.**
DECOVALEX – Mathematical models of coupled T-H-M processes for nuclear waste repositories. Report of phase III.
SKI report in print, 1995.
- 5.5-25 Larson S-Å, Tullborg E-L**
Tectonic regimes in the Baltic shield during the last 1200 Ma – A review.
SKB Technical Report TR 94-05, Stockholm, 1994.
- 5.5-26 Muir-Wood R**
Reconstructing the tectonic history of Fennoscandia from its margins – The past 100 million years.
SKB Technical Report (i manuskript), Stockholm, 1995.
- 5.5-27 Ahlbom K, Äikäs T, Ericsson L O**
SKB/TVO Ice Age Scenario.
SKB Technical Report TR 91-32, Stockholm, 1991.
- 5.5-28 Björk S, Svensson N-O**
Climatic changes and uplift patterns – past, present and future.
SKB Technical Report TR 92-38, Stockholm, 1992.
- 5.5-29 Eronen M, Olander H**
On the worlds ice ages and changing environments.
TVO Report YJT-90-13, Helsinki, 1990.
- 5.5-30 Maddock R H, Hailwood E A, Rhodes E J**
Direct fault dating trials at the Äspö Hard Rock Laboratory.
SKB Technical Report TR 93-24, Stockholm, 1993.
- 5.5-31 Ljunggren C, Persson M**
Beskrivning av databas om bergspänningsmätningar i Sverige.
SKB Djupförvar Projektrapport (i manuskript), Stockholm, 1995.
- 5.5-32 Boulton G S, Payne A**
Simulation of the European ice sheet through the last glacial cycle and prediction of future glaciation.
SKB Technical Report TR 93-14, Stockholm, 1992.
- 5.5-33 Boulton G S, Caban P, Punkari M**
Sub-surface conditions in Sweden produced by climate change, including glaciation. Project 2 Sensitivity tests and model testing.
SKB Arbetsrapport (i manuskript), Stockholm, 1995.
- 5.5-34 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.

- 5.5-35 Israelsson J, Rosengren L, Stephansson O**
Sensitivity study and rock mass response to glaciation at Finnsjön, central Sweden.
SKB Technical Report TR 92-34, Stockholm, 1992.
- 5.5-36 Björk S, Svensson N-O**
Östersjön och Västerhavet.
Sveriges Nationalatlas, Berg och jord, Stockholm, 1994.
- 5.5-37 Påsse T**
Lake-tilting investigations in southern Sweden.
SKB Technical Report (i manuskript), Stockholm, 1995.
- 5.5-38 Risberg J, Sandgren P**
Shore displacement and evidence of irregular isostatic uplift during early holocene in south-western Värmland, western Sweden.
SKB Technical Report (i manuskript), Stockholm, 1995.
- 5.5-39 Johansson J M**
First results from the Fennoscandian GPS networks.
AGU Fall Meeting 1993.
- 5.5-40 Lagerbäck R**
Neotectonic structures in northern Sweden.
Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar, 1979.
- 5.5-41 Olesen O**
A geophysical investigation of the relationship between old fault structures and postglacial faults in Finnmark, northern Norway.
Doktor Ingeniöravhandling 1991:54. Institutt for petroleumsteknologi og anvendt geofysikk, NTH, Trondheim, 1991.
- 5.5-42 Lagerbäck R**
Seismically deformed sediments in the Lansjärv area, northern Sweden.
SKB Technical Report TR 91-17, Stockholm, 1991.
- 5.5-43 Bäckblom G (ed), Stanfors R (ed)**
Interdisciplinary study of post-glacial faulting in the Lansjärv area northern Sweden 1986-1988.
SKB Technical Report TR 89-31, Stockholm, 1989.
- 5.5-44 Stanfors R, Ericsson L O**
Post-glacial faulting in the Lansjärv area, northern Sweden. Comments from the expert group on a field visit at the Molberget post-glacial fault area, 1991.
SKB Technical Report TR 93-11, Stockholm, 1993.
- 5.5-45 Sjöberg R**
Bedrock caves and fracture rock surfaces in Sweden. Occurrence and origin.
Doctoral Thesis, Paleogeophysics & Geodynamics, Stockholm University, Stockholm, 1994.
- 5.5-46 Wahlström R, Kim W, Uski M**
Regional spectral scaling relations of source parameters for earthquakes in the Baltic Shield.
Tectonophysics 166, Uppsala, 1989.
- 5.5-47 Wahlström R**
Fennoscandian seismicity and its relation to the isostatic rebound.
Global and planetary change, 8. Elsevier, 1993.
- 5.5-48 Slunga R, Nordgren L**
Earthquake measurements in southern Sweden, October 1 - March 31, 1987.
SKB Technical Report TR 87-27, Stockholm, 1987.
- 5.5-49 Slunga R**
The seismicity of southern Sweden, 1979-1984, final report.
FOA report C20572-T1, ISSN 0347-3694, Stockholm, 1985.
- 5.5-50 Slunga R**
Earthquake mechanisms in northern Sweden, October 1987 - April 1988.
SKB Technical Report TR 89-28, Stockholm, 1989.
- 5.5-51 Muir Wood R**
A review of the seismotectonics of Sweden.
SKB Technical Report TR 93-13, Stockholm, 1993.
- 5.5-52 Röshoff K**
Seismic effects on bedrock and underground constructions. A literature survey of damage on constructions; changes in ground-water levels and flow; changes in chemistry in groundwater and gases.
SKB Technical Report TR 89-30, Stockholm, 1989.

5.5-53 Komada H

Study on earthquake resistance of large underground caverns.

CRIEPI, Japan, 1993.

5.5-54 Ofoegbu G I et al.

Field site investigations: Effect of mine seismicity on groundwater hydrology.

NUREG/CR-6283, CNWRA 94-017. Prepared for US Nuclear Regulatory Commission, Washington, 1995.

5.5-55 Muir-Wood R

Earthquakes, water and underground waste disposal. Waste disposal and geology – Scientific perspective. The Committee of the workshop WC-1 of the 29th IGC.

Tokyo, Japan, 1992.

5.5-56 Leijon B

Bergets rörelsebenägenhet – En översikt över mekaniska processer, parametrar och samband.

SKB Arbetsrapport AR 93-44, Stockholm, 1993.

5.5-57 Johansson J, Stille H

PM angående lager för utbränt kärnbränsle – en bergprojektörs synpunkter.

SKB Arbetsrapport AR 94-20, Stockholm, 1994.

5.5-58 Maddock R H et al.

Isotopic dating investigation of fault gouge from the Äspö Hard Rock Laboratory, SE Sweden.

Submitted to Journal of Geological Society of London, UK, 1995.

5.5-59 Munier R

Segmentation, fragmentation and jostling of the Baltic shield with time.

Acta Universitatis Upsaliensis. Uppsala Dissertations from the Faculty of Science, Uppsala, 1993.

5.5-60 Stephens M et al.

Karta över Sveriges berggrund.

SGU serie BA nr 51, Uppsala, 1994.

5.5-61 Berthelsen A, Marker M

Ga old strike-slip megashears in the Baltic Shield and their plate tectonic implications.

Tectonophysics 128, 1986.

5.5-62 Turcotte D L

Fractals and chaos in geology and geophysics.

Cambridge University Press, New York, USA, 1992.

5.5-63 Korvin G

Fractal models in the earth sciences.

Elsevier, Amsterdam, 1992.

5.5-64 Dershowitz W et al.

The implication of fractal dimension in hydrogeology and rock mechanics.

SKB Technical Report TR 92-17, Stockholm, 1992.

5.5-65 Domenico P A

Concepts and models in groundwater hydrology.

McGraw-Hill Book Company, 1972.

5.5-66 Claesson J, Hellström G, Probert T

Buoyancy flow in fractured rock with a salt gradient in the groundwater. A second study of coupled salt and thermal buoyancy

SKB Technical Report TR 92-41, Stockholm, 1992.

5.5-67 Cosma C, Juhlin c, Olsson O

Reassessment of seismic reflection data from the Finnsjön study site and perspectives for future surveys.

SKB Technical Report TR 94-03, Stockholm, 1994.

5.5-68 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, Vienna, 1991.

5.5-69 Rhén I (ed)

Granskning av utvärderings- och fältundersökningsmetoder vid hydrauliska tester – HYDRIS-gruppens sammanfattning

SKB Arbetsrapport (i manuskript), Stockholm, 1995.

5.5-70 Larsson E

Two phase flow in the disturbed zone around a drift in rock.

SKB Arbetsrapport AR 92-76, Stockholm, 1992.

5.5-71 LBL

Two-Phase Flow Notebook from Two-Phase Flow Workshop, Berkeley City Club, November 3-4, 1993, Berkeley, California, 1993.

- 5.5-72 Andersson P**
Compilation of tracer tests in fractured rock.
SKB Äspö HRL Progress Report 25-95-05. Stockholm, 1995.
- 5.5-73 Rhén I, Svensson U, Andersson J-E, Andersson P, Eriksson C-O, Gustafsson E, Ittner T, Nordqvist R**
Äspö Hard Rock Laboratory. Evaluation of the combined longterm pumping and tracer test (LPT2) in borehole KAS06.
SKB Technical Report TR 92-32, Stockholm, 1992.
- 5.5-74 Uchida et al.**
Discrete-fracture modelling of the Äspö LPT-2, large-scale pumping and tracer test.
SKB Äspö HRL ICR 94-09, Stockholm, 1994.
- 5.5-75 Follin S**
On the interpretation of double-packer tests in heterogeneous porous media: Numerical simulations using the stochastic continuum analogue.
SKB Technical Report TR 92-36, Stockholm, 1992.
- 5.5-76 Liedholm et al.**
Extended geohydrological models of the Äspö area. SKB Palaeohydrogeological programme.
SKB Technical Report (i manuskript), Stockholm, 1995.
- 5.5-77 Elert M, Neretnieks I, Kjellbert N, Ström A**
Description of the transport mechanisms and pathways in the far field of a KBS-3 type repository.
SKB Technical Report TR 92-09, Stockholm, 1992.
- 5.5-78 Abelin H, Birgersson L, Gidlund J, Moreno L, Neretnieks I, Widén H, Ågren T**
3-D migration experiment – Report 3 – Performed experiments results and evaluation.
Stripa Project Technical Report TR 87-21, SKB, Stockholm, 1987.
- 5.5-79 de Marsily G**
Quantitative hydrogeology, groundwater hydrology for engineers.
Academic Press, Inc., Orlando, USA, 1986.
- 5.5-80 Hansen L et al.**
Byggbarhetsanalys i ett regionalt perspektiv.
SKB Arbetsrapport (under tryckning), Stockholm, 1995.
- 5.5-81 PNC**
Research and development on geological disposal of high-level radioactive waste.
First Progress Report, Tokyo, Japan, 1992.
- 5.5-82 Olsson O, Neretnieks I, Cvetkovic V**
Delibrations on radionuclide transport and rationale for tracer transport experiments to be performed at Äspö – A selection of papers.
SKB Äspö HRL Progress Report 25-95-01, Stockholm, 1994.
- 5.5-83 Eliasson T**
Mineralogy, geochemistry and petrophysics of red coloured granite adjacent to fractures.
SKB Technical Report TR 93-06, Stockholm, 1993.
- 5.5-84 Hakami E**
Aperture distribution of rock fractures.
Doktorsavhandling. Avd för teknisk geologi, Inst för anläggning och miljö, KTH, Stockholm, 1995.
- 5.5-85 Olsson O, Bäckblom G, Gustafson G, Rhén I, Stanfors R, Wikberg P**
The structure of conceptual models with application to the Äspö HRL project.
SKB Technical Report TR 94-08, Stockholm, 1994.
- 5.5-86 Olsson O and Gale J E**
Site assessment and characterization for high-level nuclear waste disposal: results from the Stripa project, Sweden.
Quarterly Journal of Engineering Geology, 28, The Geological Society, UK, 1995.
- 5.5-87 Se 1-20**
- 5.5-88 Se 5.6-9**
- 5.5-89 SKB 91**
Final disposal of spent nuclear fuel. Importance of the bedrock for safety.
SKB Technical Report TR 92-20, Stockholm, 1992.
- 5.5-90 Allard B, Karlsson F, Neretnieks I**
Concentrations of particulate matter and humic substances in deep groundwaters and estimated effects on the adsorption and transport of radionuclides.
SKB Technical Report TR 91-50, Stockholm, 1991.

5.5-91 Bossart P, Mazurek M

Structural geology and water flow-paths in the migration shear-zone. Grimsel Test Site.

NAGRA Technical Report 91-12, Schweiz, 1991.

5.5-92 Se 5.6-10

5.5-93 Bergman M et al.

Utnyttjande av numeriska beräkningsmodeller för geoteknisk projektering av anläggningar i berg.

BeFo, Arbetsrapport från projekt 132, Stockholm, 1988.

5.5-94 Tsang C F

Coupled behaviour of joints.

Proceedings of ISRM Conference, Loen, Norway. Balke-ma, 1990.

5.5-95 Tsang C F (ed)

Coupled processes associated with a nuclear waste repository.

Academic Press, San Diego, CA, USA, 1987.

5.5-96 Hermansson H-P et al.

Geogastransport i berg. Förstudie.

SKN rapport 43, Stockholm, 1991.

**5.5-97 Wikramaratna R S, Goodfield M,
Rodwell W R, Nash P J, Agg P J**

A preliminary assessment of gas migration from the Copper/Steel Canister.

SKB Technical Report TR 93-11, Stockholm, 1993.

**5.5-98 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, 1992.

5.5-99 Follin S

Numerical calculations on heterogeneity of groundwater flow.

SKB Technical Report TR 92-14, Stockholm, 1992.

5.5-100 Geier J E, Dershowitz W S

Data requirements for discrete fracture network modelling.

SKB Djupförvar Projektrapport PR 44-92-009, Stockholm, 1994.

5.5-101 Winberg A

Data needs for stochastic continuum modelling of groundwater flow and solute transport.

SKB Djupförvar Projektrapport PR 44-94-002, Stockholm, 1994.

5.5-102 Gylling B, Moreno L, Neretnieks I

Data requirements for the channel network model.

SKB Djupförvar Projektrapport PR 44-94-014, Stockholm, 1994.

5.5-103 Boghammar A, Grundfelt B, Widén H

Analysis of the regional groundwater flow in the Finnsjön area.

SKB Technical Report TR 93-15, Stockholm, 1993.

5.5-104 la Pointe P R

Evaluation of stationary and non-stationary geostatistical models for inferring hydraulic conductivity values at Äspö.

SKB Technical Report TR 94-22, Stockholm, 1994.

5.5-105 Röshoff K

The tectonic-fracture pattern in southern Sweden.

Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar, Vol 100, Stockholm, 1979.

5.5-106 Tirén S, Beckholmen M

Rock block map analysis of southern Sweden.

Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar, Vol 114, Stockholm, 1992.

5.5-107 Strömberg A

A pattern of tectonic zones in the western part of the East European Platform.

Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar, Vol 98, Stockholm, 1976.

5.5-108 Gustafson G, Ström A

Evaluation report on Task 1, the LPT2 large scale field experiment.

SKB Äspö HRL ICR (i manuskript), Stockholm, 1995.

5.5-109 Igarashi T, Tanaka Y, Kawanishi M

Application of three-dimensional smeared fracture model to the groundwater flow and the solute migration of LPT-2 experiment.

SKB Äspö HRL ICR 94-08, Stockholm, 1994.

- 5.5-110 Wersin P, Bruno J, Laaksoharju M**
The implications of soil acidification on a future HLW repository. Part II: Influence on deep granitic groundwater. The Klipperås study site as test case.
SKB Technical Report TR 94-31, Stockholm, 1994.
- 5.5-111 Kobayashi A, Yamashita R, Chijimatsu M, Nishiyama H, Ohnishi Y**
Analyses of LPT2 in the Äspö HRL with continuous anisotropic heterogeneous model.
SKB Äspö HRL ICR 94-07, Stockholm, 1994.
- 5.5-112 Rehbinder G**
Analytical solutions of stationary coupled thermo-hydro-mechanical problems.
Submitted to Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1995.
- 5.5-113 Gylling B, Moreno L, Neretnieks I, Birgersson L**
Analysis of LPT2 using the Channel Network model.
SKB Äspö HRL ICR 94-05, Stockholm, 1994.
- 5.5-114 Taivassalo V, Koskinen L, Laitinen M, Löfman J, Mészáros F**
Modelling the LPT2 Pumping and Tracer Test at Äspö. Pumping test.
SKB Äspö HRL ICR 94-12, Stockholm, 1994.
- 5.5-115 Hautojärvi A**
Data analysis and modelling of the LPT2 Pumping and Tracer Transport Test at Äspö. Tracer experiment.
SKB Äspö HRL ICR 94-11, Stockholm, 1994.
- 5.5-116 Holton D, Herbert A, Lanyon G W**
Application of a coupled discrete-continuum modelling approach to the LPT2-experiment at Äspö.
SKB Äspö HRL ICR (i manuskript), Stockholm, 1995.
- 5.5-117 La Pointe P R, Wallmann P, Follin S**
Estimation of effective block conductivities based on discrete network analyses using data from the Äspö site.
SKB Technical Report TR 95-15, Stockholm, 1995.
- 5.7-118 Boulton G S, Caban P, Hulton N**
Sub-surface conditions produced by long term future climate changes, including glaciation. Project 3: Further developments in modelling.
SKB Arbetsrapport (i manuskript), Stockholm, 1995.
- 5.5-119 Hakami E, Larsson E**
Geometry and hydraulic characteristics of rock fractures – Experimental technique for aperture measurement of intersecting joints – Flow calculations in fractures.
SKB Arbetsrapport AR 93-33, Stockholm, 1993.
- 5.5-120 Hakami E, Larsson E**
Geometry and hydraulic characteristics of rock fractures – Laboratory experiments with water flow in natural rock fractures.
SKB Arbetsrapport AR 94-18, Stockholm, 1994.
- 5.5-121 Andersson O**
Deep drilling KLX 02. Drilling and documentation of a 1700 m deep borehole at Laxemar, Sweden.
SKB Technical Report TR 94-19, Stockholm, 1994.
- 5.5-122 Carlsten S**
Drilling KLX02 – Phase 2. Lilla Laxemar, Oskarshamn. Correlation of radar reflectors between boreholes KLX01 and KLX02.
SKB Arbetsrapport AR 94-28, Stockholm, 1994.
- 5.5-123 Kornfält K A, Wikman H**
Drilling KLX02 – Phase 2. Lilla Laxemar, Oskarshamn. – Petrological classification of core samples and drill cuttings.
SKB Arbetsrapport AR 94-50, Stockholm, 1994.
- 5.5-124 Andersson O**
Djupborrning KLX02 – Etapp 1. Lilla Laxemar, Oskarshamns kommun. Projektprogram och metodbeskrivningar.
SKB Arbetsrapport AR 94-35, Stockholm, 1994.
- 5.5-125 Carlsten S**
Drilling KLX02 – Phase 2. Lilla Laxemar, Oskarshamn. – Borehole radar measurements in KLX02.
SKB Arbetsrapport AR 93-43, Stockholm, 1993.
- 5.5-126 Petro Bloc AB**
Djupborrning KLX02 – Etapp 1. Lilla Laxemar, Oskarshamns kommun. MWD – Primärdata, borrrparametrar.
SKB Arbetsrapport AR 93-30, Stockholm, 1993.
- 5.5-127 Follin S**
Djupborrning KLX02 – Etapp 1. Lilla Laxemar, Oskarshamns kommun. Evaluation of the hydraulic testing of KLX02.
SKB Arbetsrapport AR 94-21, Stockholm, 1993.

- 5.5-128 Munier R**
Drilling KLX02 – Phase 2. Lilla Laxemar, Oskarshamn. Description of geological structures in and near boreholes KLX02 and KLX01, Laxemar.
SKB Arbetsrapport AR 94-23, Stockholm, 1993.
- 5.5-129 Andersson O**
Djupborrning KLX02 – Etapp 1. Lilla Laxemar, Oskarshamns kommun. Utvalda tekniska rådata.
SKB Arbetsrapport AR 94-36, Stockholm, 1994.
- 5.5-130 Andersson O**
Djupborrning KLX02 – Etapp 1. Lilla Laxemar, Oskarshamns kommun. Projektbeskrivning och administration.
SKB Arbetsrapport AR 94-34, Stockholm, 1994.
- 5.5-131 Journel A G**
Fundamentals of geostatistics in five lessons. Short course in geology: Volume 8, American Geophysical Union, Washington, 1989.
- 5.5-132 Rosenbaum M S**
The use of stochastic models in the assessment of a geological database.
Quarterly Journal of Engineering Geology, London. Vol 20. UK, 1987.
- 5.5-133 Freeze A et al.**
Hydrogeological decision analysis. 1A. Framework.
GroundWater Vol 28 No 5, 1990.
- 5.5-134 Freeze A et al.**
Hydrogeological decision analysis. 2. Applications to groundwater contamination.
GroundWater Vol 29 No 4, 1991.
- 5.5-135 Sperling T et al.**
Hydrogeological decision analysis. 3. Application to design of a groundwater control system at an open pit mine.
GroundWater Vol 30 No 3, 1991.
- 5.5-136 Freeze A et al.**
Hydrogeological decision analysis. 4. Data worth and the development of site investigation strategies.
GroundWater Vol 30 No 4, 1992.
- 5.5-137 Wold S**
Principal component analyses. Chemometric and Intelligent Laboratory Systems, 2, 35-37, 1987.
- 5.5-138 Kung C S, Wen X H, 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, 1992.
- 5.5-139 Rosén L, Gustafson G**
Possible strategies for geoscientific classification for high-level waste repository site selection.
SKB Technical Report TR 93-12, Stockholm, 1993.
- 5.5-140 Rosén L, Gustafson G**
A Markov-Bayes geostatistical model (MOB) for estimating hydrogeological and geological properties in repository site selection.
SKB Arbetsrapport (i manuskript), Stockholm, 1995.
- 5.5-141 Wen X H, Kung C S**
Stochastic simulation of solute transport in heterogeneous formations: A comparison of parametric and nonparametric geostatistical approaches.
GroundWater Vol 31, No 6, 1993.
- 5.5-142 Wen X H, Kung C S, Winberg A**
Stochastic continuum simulation of solute transport in heterogeneous formations using hard and soft information.
Memoirs of the XXIVth congress, International Association of Hydrogeologists, 28th June -2nd July 1993, Ås, Norway. "Hydrogeology of Hard Rocks" – Sheila and David Banks (edr) NGU, Norway, 1993.
- 5.5-143 Winberg A et al.**
Calibration and validation of a stochastic continuum solute transport model using the Finnsjön Dipole Tracer Test. Proceedings from: "Statistics fo Spatial Processes: Theory and Applications", Bari, September 27-30, 1993. Italy, 1993.
- 5.5-144 Smellie J, Laaksoharju M**
The Äspö Hard Rock Laboratory: Final evaluation of the hydrogeochemical pre-investigations in relation to existing geologic and hydraulic conditions.
SKB Technical Report TR 92-31, Stockholm, 1992.
- 5.5-145 Laaksoharju M, Smellie J, Nilsson A-C, Skårman C**
Groundwater sampling and chemical characterisation of the Laxemar deep borehole KLX02.
SKB Technical Report TR 95-05, Stockholm, 1995.

- 5.5-146 Laaksoharju M, Skårman C, Smellie J**
Groundwater sampling and chemical characterization of the HRL tunnel at Äspö, Sweden.
SKB Progress Report (i manuskript), Stockholm, 1995.
- 5.5-147 Wallin B, Peterman B**
SKB/DOE geochemical investigations using stable and radiogenic isotopic methods – First year.
SKB Äspö HRL ICR 94-06, Stockholm, 1994.
- 5.5-148 Wallin B**
Palaeohydrological implications in the Baltic area and its relation to the groundwater at Äspö, south-eastern Sweden – A literature study.
SKB Technical Report TR 95-06, Stockholm, 1995.
- 5.5-149 Banwart S (ed)**
The Redox experiment, Project summary and performance assessment implications.
SKB Technical Report (i manuskript), Stockholm, 1995.
- 5.5-150 Laaksoharju M (ed)**
Sulphate reduction in the Äspö HRL Tunnel.
SKB Technical Report (i manuskript), Stockholm, 1995.
- 5.5-151 Wikström L, Björklund A**
Trace elements in waters of low-conductivity rocks in the Äspö Hard Rock Laboratory.
SKB Äspö HRL Progress Report PR 25-94-28, Stockholm, 1994.
- 5.5-152 Nilsson A-C,**
Compilation of groundwater chemistry data from Äspö 1990-1994.
SKB Äspö HRL Progress Report PR 25-95-02, Stockholm, 1994.
- 5.5-153 Landström O, Tullborg E-L**
Interaction of trace elements with fracture filling minerals from the Äspö HRL.
SKB Technical Report TR 95-13, Stockholm, 1995.
- 5.5-154 Banwart S (ed.)**
Proceedings of the Äspö International Geochemistry Workshop, June 2-3, 1994. Äspö Hard Rock Laboratory.
SKB Äspö HRL ICR 94-13, Stockholm, 1994.
- 5.5-155 Banwart S (ed)**
The redox experiment in block scale.
SKB Äspö HRL Progress Report PR 25-95-06, Stockholm, 1995.
- 5.5-156 Malmström M, Banwart S, Duro L, Wersin P, Bruno J**
Biotite and chlorite weathering at 25°C.
SKB Technical Report TR 95-01, Stockholm, 1995.
- 5.5-157 Laaksoharju M, Smellie J, Routsalainen P, Snellman M**
An approach to quality classification of deep groundwaters in Sweden and Finland.
SKB Technical Report TR 93-27, Stockholm, 1993.
- 5.5-158 Wikberg P, Ericsson L-O, Rhén I, Wallroth T, Smellie J**
SKB framework for regional groundwater modelling including geochemical-hydrogeological model integration and palaeohydrogeology.
SKB Äspö HRL Progress Report PR 25-95-11, Stockholm, 1995.
- 5.5-159 Nebot J, Bruno J**
The implications of soil acidification on a future HLNW repository. Part I: The effects of increased weathering, erosion and deforestation.
SKB Technical Report TR 91-45, Stockholm, 1991.

Avsnitt 5.6 – KEMI

5.6-1 SKB Annual Report 1991

SKB Technical Report 91-64, p 97, Stockholm, 1992.

5.6-2 Se 1-14

5.6-3 Östhols E, Bruno J, Grenthe I

On the influence of carbonate on mineral dissolution III: The solubility of microcrystalline ThO₂ in CO₂-H₂O media.

Geochemica et Cosmochemica Acta, Vol 58, No 2, pp 613-623, 1994.

5.6-4 Eriksen T, Ndalamba P, Spahiu K, Bruno K

Solubility of neptunium(IV) hydrous oxide in neutral to alkaline solutions. Effect of carbonate complexation.

Environmental Science and Technology (in press), 1995.

5.6-5 Se 1-15

5.6-6 Engkvist I, Albinsson Y

Thorium complexation with phosphate.

Proceedings to Fourth International Conference on Chemistry and Migration Behaviour of Actinides and Fission Products in the Geosphere. Charleston, USA, December 12-17, 1993, R Oldenburg Verlag, München, 1994.

5.6-7 Moskvina A, Essen L N, Bukhtiyarova T N

The formation of Th(IV) and U(IV) complexes in phosphate solutions.

Russian Journal of Inorganic Chemistry, Vol 12, p 1794, 1967.

5.6-8 Se 1-16

5.6-9 Carbol P, Engkvist I

Sorption och sorptionsmodeller. Tillämpningar och begränsningar i säkerhetsanalys.

SKB Arbetsrapport (i manuskript), Stockholm, 1995.

5.6-10 Ohlsson Y, Neretnieks I

Literature survey of matrix diffusion theory and of experiments and data including natural analogues.

SKB Technical Report TR 95-12, Stockholm, 1995.

5.6-11 Christiansen-Sätmark B

Transport of radionuclides and colloid through quartz sand columns.

Doctoral thesis, Dept of Nuclear Chemistry, Chalmers University of Technology, Göteborg, 1995.

5.6-12 Degueldre C, Laaksoharju M, Skårman Ch

Studies of colloids and their importance for repository performance assessment.

SKB Arbetsrapport (i manuskript), Stockholm, 1995.

5.6-13 Nordén M

The complexation of some radionuclides with natural organics – implications for radioactive waste disposal.

Doctoral thesis, Dept of Water and Environmental Studies, Linköping University, 1994.

5.6-14 Nordén M, Ephraim J H, Allard B

The influence of fulvic acid on the adsorption of europium and strontium by alumina and quartz: Effects of pH and ionic strength.

Radiochemica Acta, Vol 65, pp 265-270.

5.6-15 Karlsson F, Allard B, Hummel W, Sargent F P, Vieno T, Voinis S, Merceron T, Yoshikawa H

Natural organic substances in granitic groundwater and their implications for nuclear waste disposal.

In "Workshop of Binding Models Concerning Natural Organic Substances in Performance Assessment", held jointly by OECD/NEA and PSI in Bad Zurzach, Switzerland, 14-16 September 1994.

5.6-16 Se 5.4-21

5.6-17 Pedersen K, Ekendahl S

Distribution and activity of bacteria in deep granitic groundwaters in southeastern Sweden.

Microb Ecol, Vol 20, pp 37-52.

5.6-18 Pedersen K, Ekendahl S

Incorporation of CO₂ and introduced organic compounds by bacterial populations in groundwater from deep crystalline bedrock of the Stripa mine.

Journal of General Microbiology, Vol 138, pp 369-376.

5.6-19 Bateman K, Coombs P, Noy D J, Pearce J M, Wetton P

NAGRA/Nirex/SKB column experiments: Results of experiments and modelling.

British Geological Survey, Report No WE 95/25C. SKB Arbetsrapport AR 95-16, Stockholm, 1995.

5.6-20 Karlsson F, Wiborgh M

Chemotoxic aspects of radioactive waste in Sweden.

In Proceedings from Spectrum 94, Nuclear and Hazardous Waste Management International Topic Meeting in Atlanta, Georgia, USA, August 14-18, 1994, Vol 2, pp 1371-1376, 1994.

Avsnitt 5.7 – NATURLIGA ANALOGIER

5.7-1 Smellie J, Karlsson F, Grundfelt B

The potential use of natural analogue studies in radioactive waste disposal: A review.

Proceedings from the conference GEOVAL '94, in Paris, October 11-14, 1994, 1995.

5.7-2 Miller W M, Alexander R, Chapman N, McKinley I, Smellie J

Natural analogue studies in the geological disposal of radioactive wastes.

Elsevier, Amsterdam, 412 pages, 1994.

5.7-3 Brandberg F, Grundfelt B, Höglund L O, Karlsson F, Skagius K, Smellie J

Studies of natural analogues and geological systems – Their importance to performance assessment.

Report YJT-93-07, Helsinki, 1993, or

SKB Technical Report TR 93-05, Stockholm, 1993.

5.7-4 Cramer J, Smellie J

Final report of the AECL/SKB Cigar Lake Analogue Study.

AECL Report AECL-10851, Pinawa, Manitoba, 1994, or SKB Technical Report TR 94-04, Stockholm, 1994.

5.7-5 Alexander R (Editor)

A natural analogue study of the Maqarin hyperalkaline groundwaters. I. Source term description and thermodynamic database testing.

NAGRA Technical Report NTB TR 91-10, 1992.

Avsnitt 5.8 – BIOSFÄREN

5.8-1 FINAL REPORT. BIOMOV5

Technical report 15, SSI, March, 1993.

5.8-2 Nordlinder S, Bergström U

Osäkerheter i dosberäkningar från förvar av högaktivt avfall.

SKB Arbetsrapport AR 95-15, Stockholm, juni 1995.

5.8-3 Nordlinder S, Sundblad B, Stiglund Y

The importance of different types of recipients for the individual doses from inflow of radionuclides via the groundwater.

SKB Arbetsrapport AR 94-25, Stockholm, 1994.

5.8-4 Sundblad B, Mathiasson L

Recipient studies at the Äspö Hard Rock Laboratory.

SKB Arbetsrapport AR 94-52, Stockholm, 1994.

5.8-5 Puigdomenech I, Bergström U

Calculated of distribution coefficients for radionuclides in soils and sediments.

Published in Nuclear Safety, Vol 36-1, 1995.

5.8-6 Bergström U, Nordlinder S, Aquilonius K

BIOPATH/PRISM: Codes for calculating turnover of radionuclides in the biosphere and doses to man.

SKB Arbetsrapport AR 95-19, Stockholm, February, 1995.

5.8-7 Landström O, Aggeryd I, Mathiasson L, Sundblad B

Chemical composition of sediments from the Äspö area and interaction between biosphere and geosphere.

SKB Arbetsrapport AR 94-13, Stockholm, 1994.

5.8-8 Aggeryd I, Sundblad B, Landström O, Mathiasson L, Stiglund Y

Inventering av platsers lämplighet för studier av naturliga analogier.

SKB Arbetsrapport AR 94-41, Stockholm, 1995.

Studsvik ES93/57.

Avsnitt 5.9 – ANNAT AVFALL

5.9-1 Wiborgh M (Editor)

Prestudy of final disposal of long-lived low and intermediate level waste.

SKB Technical Report TR 95-03, Stockholm, 1995.

5.9-2 PLAN 93

Kostnader för kärnkraftens radioaktiva restprodukter.

SKB Rapport (med separat del för bilagor), Stockholm, 1993.

5.9-3 Lindgren M, Brodén K, Carlsson J, Johansson M, Pers K

Low and intermediate level waste for SFL 3-5.

SKB Arbetsrapport AR 94-32, Stockholm, 1994.

5.9-4 Lindgren M, Pers K

Radionuclide release from the near-field of SFL 3-5. A preliminary study.

SKB Arbetsrapport AR 94-54, Stockholm, 1994.

5.9-5 Se 5.2-5

Kapitel 6 – Kunskapsläge – kapsel och inkapsling

6-1 Wersin P, Spahiu K, Bruno J

Kinetic modelling of bentonite-canister interaction.
Long-term predictions of copper canister corrosion under
oxic and anoxic conditions.

SKB Technical Report TR 94-25, Stockholm, 1994.

6-2 Christensen H, Bjergbakke E

Radiolysis of groundwater from HLW stored in copper
canisters.

SKBF/KBS Technical Report TR 82-02, Stockholm,
1982.

6-3 The Swedish Corrosion Research Institute and its reference group

Corrosion resistance of a copper canister for spent nuclear
fuel.

SKBF/KBS Technical Report TR 83-24, Stockholm,
1983.

6-4 Project Alternative Systems Study (PASS) Final Report.

SKB Technical Report TR 93-04, Stockholm, 1992.

6-5 Oversby V M, Werme L O

Canister filling materials – Design requirements and eval-
uation of candidate materials.

Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 353, p. 743, 1995.

6-6 Risenmark S, Aurren J, Hjärne L

Inledande studie beträffande slutförvaring av LWR-bräns-
le.

SKB Projekt Inkapsling, Projekt PM PPM 95-3430-02,
Stockholm, 1994.

6-7 Efraimsson H

Kriticitetsberäkningar för kapsel med gjutjärnsinsats för
slutförvaring av LWR-bränsle.

SKB Projekt Inkapsling, Projekt PM PPM 95-3430-04,
Stockholm, 1995.

6-8 Bäcklin A

Methods for fuel monitoring at the planned encapsulation
plant.

SKB Projekt Inkapsling, Projekt PM 95-3430-06. Stock-
holm, 1995.

6-9 Bowman C D, Venneri F

Underground supercriticality from plutonium and other
fissile material.

Los Alamos National Laboratory,
Report LA-UR 94-4022A

6-10 Behrenz P, Hannerz K

Criticality in a spent fuel repository in wet crystalline rock.

KBS Teknisk Report 108, Stockholm, 1978.

6-11 van Konynenburg R A (sammanställd av)

Comments on the draft paper "Underground supercritica-
lity from plutonium and other fissile material", written by
C D Bowman and F Venneri (LANL).

Lawrence Livermore National Laboratory, Report UCRL-
ID-120990 COM, 1995.

6-12 Benjamin L A, Hardie D, Parkins R N

Stress corrosion resistance of pure coppers in ground
waters and sodium nitrite solutions.

Br. Corros. J. Vol. 23, p. 89, 1988.

6-13 Rosborg B, Svensson B-M

Spänningskorrosionsprovning av koppar i syntetiskt
grundvatten.

Studsvik Report STUDSVIK/M-94/73, 1994.

6-14 Werme L O, Sellin P, Kjellbert N

Copper canister for nuclear high level waste disposal.
Corrosion aspects.

SKB Technical Report TR 92-26, Stockholm, 1992.

6-15 Sjöblom R, Hermansson H-P, Amcoff Ö

Chemical durability of copper canisters under crystalline
bedrock repository conditions.

Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 353, p. 687, 1995.

6-16 Wersin P, Spahiu K, Bruno, J

Time evolution of dissolved oxygen and redox conditions
in a HLW repository.

SKB Technical Report TR 94-02, Stockholm, 1994.

6-17 The Swedish Corrosion Research Institute and its reference group

Copper as canister material for unreprocessed nuclear
waste – evaluation with respect to corrosion.

KBS Teknisk Rapport TR 90, Stockholm, 1978.

- 6-18 Blackwood D J, Henshaw J, Platts N, Hilditch J P**
Stress corrosion cracking of the advanced cold process canister: carbon steel in nitric acid vapour.
AEA Technology, Report AEA-ESD-0288, 1995.
- 6-19 Platts N, Blackwood D J, Naish C C**
Anaerobic oxidation of carbon steel in granitic groundwaters: A review of relevant literature.
SKB Technical Report TR 94-01, Stockholm, 1994.
- 6-20 Blackwood D J, Hoch A R, Naish C C, Rance A, Sharland S M**
Research on corrosion aspects of the Advanced Cold Process Canister.
SKB Technical Report TR 94-12. Stockholm, 1994.
- 6-21 Hoch A R, Sharland S M**
Assessment study of the stresses induced in the Advanced Cold Process Canister.
SKB Technical Report TR 94-13, Stockholm, 1994.
- 6-22 Henshaw J**
Modelling of nitric acid production in the Advanced Cold Process Canister.
SKB Technical Report TR 94-15, Stockholm, 1994.
- 6-23 Blackwood D J, Naish C C, Rance A P**
Further research on corrosion aspects of the Advanced Cold Process Canister.
SKB Projekt Inkapsling, Projektrapport PR 95-05, Stockholm, 1994.
- 6-24 Blackwood D J, Naish C C**
The effect of galvanic coupling between the copper outer canister and the carbon steel inner canister on the Advanced Cold Process Canister.
SKB Projekt Inkapsling, Projektrapport PR 95-04, Stockholm, 1994.
- 6-25 Blackwood D J, Naish C C, Platts N, Taylor K J, Thomas M I**
The anaerobic corrosion of carbon steel in granitic groundwaters.
SKB Projekt Inkapsling, Projektrapport PR 95-03, Stockholm, 1995.
- 6-26 Eriksson J, Werme L**
Resultat från materialprovningar.
SKB Inkapsling, Projektrapport. Under utarbetande.
- 6-27 Frost H J, Ashby M F**
Deformation-mechanism maps. The plasticity and creep of metals and ceramics.
Pergamon Press, 1982.
- 6-28 Taxén C**
Pitting corrosion of copper. An equilibrium – mass transport study.
Swedish Corrosion Institute, 1995.
- 6-29 Höglund L O**
Preliminary study on the corrosion of copper canisters due to formation of copper sulphide whiskers.
SKB Projekt Inkapsling, Projekt PM PPM 95-3420-10, Stockholm, 1995.
- 6-30 Levlin E**
Corrosion of copper in anaerobic clay. Prerequisites for pitting and whiskers formation.
SKB Projekt Inkapsling, Projekt PM PPM 95-3420-09, Stockholm, 1995.
- 6-31 Eriksson J**
Provtillverkning av kapslar för slutförvaring av använt kärnbränsle.
SKB Projekt Inkapsling, Projektrapport PR 95-12, Stockholm, 1995.
- 6-32 Burström M, Ericsson S, Lönnerberg B, Tegman R**
Manufacturing of copper containers by hot isostatic pressing for nuclear waste containment.
Institutet för Verkstadsteknisk Forskning, IVF-report 95/20, 1995.
- 6-33 Tegman R, Burström M**
HIP-inneslutning av använt kärnbränsle i koppar. Rapport I.
SKB Projekt Inkapsling, Projektrapport 95-06, Stockholm, 1995.
- 6-34 Larker H, Tegman R, Burström M**
HIPOW-inneslutning av använt kärnbränsle i koppar. Rapport II.
SKB Projekt Inkapsling, Projektrapport 95-07, Stockholm, 1995.

6-35 Larker H, Tegman R, Burström M

HIPOW-inneslutning av använt kärnbränsle i koppar. Rapport III.

SKB Projekt Inkapsling, Projektrapport 95-08, Stockholm, 1995.

6-36 Larker H, Tegman R, Burström M

HIPOW-inneslutning av använt kärnbränsle i koppar. Rapport IV.

SKB Projekt Inkapsling, Projektrapport 95-08, Stockholm, 1995.

6-37 Loberg B, Easterling K E

Metallographic study of hot isostatically pressed copper encapsulation of nuclear fuel elements.

Mat. Res. Soc. Proc. Vol. 50 p. 453, 1985.

6-38 Ekbohm L B, Bogegård S

Copper produced from powder by HIP to encapsulate nuclear fuel elements.

SKB Technical Report TR 89-10, Stockholm, 1989.

**6-39 Sanderson A, Szluha T F, Ribton C N,
Dance B G I, Day A B**

The application of high power non-vacuum EB welding for encapsulation of nuclear waste at reduced pressure – Summary report.

SKB Projekt Inkapsling, Projektrapport 94-01, Stockholm, 1994.

**6-40 Nightingale K R, Sanderson A, Kell J M,
Ribton C N, Day A B**

Electron beam welding of copper canister lids in reduced pressure demonstration facility.

TWI Report 220278/1/95, 1995.

6-41 Dawes C J, Sketchley P D

Encapsulation of nuclear waste by friction welding.

SKB Arbetsrapport AR 92-06, Stockholm, 1991.

6-42 Burström M

Friction welding of large size copper containers – A pilot study.

Institutet för Verkstadsteknisk Forskning, IVF-report 93005, 1993.

6-43 Bell K

Tearing resistance and integrity assessment of electron beam welds in nuclear fuel canister.

TWI Report 620644/1/95, 1995.

6-44 Day A B

An investigation into optimisation of NDT of spent nuclear fuel canisters. Phase II – Feasibility study – Effectiveness of ultrasonic weld inspection techniques.

SKB Arbetsrapport AR 93-22, Stockholm, 1993.

6-45 Day A B

An investigation into optimisation of NDT of spent nuclear fuel canisters. Phase III.

TWI Report 220343/1/95, 1995.

6-46 Forsström H

Miljökonsekvensbeskrivning för inkapslingsanläggning vid CLAB.

SKB Projekt Inkapsling, Projekt PM 95-3410-01, Stockholm, September 1995.

6-47 Hillborg H

Inkapslingsanläggning. Preliminär anläggningsbeskrivning (Layout E).

SKB Projekt Inkapsling, Projektrapport 95-02, Stockholm, Juni 1995.

6-48 Gillin K

Preliminär beskrivning av inkapslingsprocessen för använt kärnbränsle.

SKB Projekt Inkapsling, Projektrapport 95-10, Stockholm, Juni 1995.

**Kapitel 8 – Kunskapsläge –
djupförvar**

8-1 Pettersson S, Svemar C samt Vattenfall Energisystem AB, Lange Art AB

Anläggningsbeskrivning. Nedfart endast via schakt.

SKB Djupförvar Arbetsrapport AR 44-93-003, Stockholm, 1993.

8-2 Pettersson S, Svemar C samt Vattenfall Energisystem AB, Lange Art AB

Anläggningsbeskrivning. Nedfart via spiralramp och serviceschakt.

SKB Djupförvar Arbetsrapport AR 44-93-004, Stockholm, 1993.

- 8-3 Pettersson S, Svemar C samt Vattenfall Energi-system AB, Lange Art AB**
Anläggningsbeskrivning. Nedfart via rak ramp.
SKB Djupförvar Arbetsrapport AR 44-93-005, Stockholm, 1993.
- 8-4 SKBF, Kärnkraftens slutsteg PLAN 83. Plan för kärnkraftens radioaktiva restprodukter.**
SKBF, Stockholm, juni 1983.
- 8-5 Bengtsson B, Isaksson C, Kalbantner P, Börgesson L**
Idéskisser till deponeringsmetod för horisontell placering av kapslar.
SKB Arbetsrapport (i manuskript).
- 8-6 Börgesson L**
Study of the mechanical function of the buffer in the concept with two canisters in a KBS 3 deposition hole.
SKB Arbetsrapport AR 93-13, Stockholm, 1993.
- 8-7 Jansson L**
Beträffande idéstudie av utrustning för deponering av två kapslar i samma vertikala deponeringshål.
SKB Arbetsrapport AR 93-01, Stockholm, 1993.
- 8-8 Lindgren M, Brodén K, Carlsson J, Johansson M, Pers K**
Low and intermediate level waste for SFL 3-5.
SKB Arbetsrapport 94-32, Stockholm, 1994.
- 8-9 Wiborgh M (Editor)**
Prestudy of final disposal of long-lived low and intermediate level waste.
SKB Technical Report TR 95-03, Stockholm, 1995.
- 8-10 PLAN 94. Costs for management of the radioactive waste from nuclear power production.**
SKB Technical Report TR 94-23, Stockholm, 1994.
- 8-11 Se 1-16**
- 8-12 Pusch R**
Executive summary and general conclusions of the rock sealing project.
Stripa Technical Report TR 92-27, SKB, Stockholm, 1992.
- 8-13 Stille H, Janson T, Olsson P**
Experiences from the grouting of the section 1340-2565 m of the tunnel.
SKB Äspö HRL Progress Report PR 25-94-13, Stockholm, 1994.
- 8-14 Johanneson L-E, Börgesson L, Sandén T**
Compaction of bentonite blocks. Development of technique for industrial production of blocks which are manageable by man.
SKB Technical Report (under framtagning).
- 8-15 Pusch R**
Consequences of using crushed crystalline rock as ballast in KBS-3 tunnels instead of rounded quartz particles.
SKB Technical Report TR 95-14, Stockholm, 1995.
- 8-16 Moreno L**
Repository tunnel filled with gravel.
SKB Technical Report (under framtagning).
- 8-17 Pusch R, Börgesson L, Wiborgh M, Jones C, Birgersson L**
Konsekvenser av längre öppethållande av deponeringstunnlar i KBS-3-förvar.
SKB Djupförvar Projektrapport (i manuskript).
- 8-18 Lindbom B, Birgersson L**
Radiologisk miljö vid djupförvaret och olycksberedskap vid transport av radioaktivt avfall.
SKB Djupförvar Projektrapport PR 44-94-038, Stockholm, 1994.
- 8-19 Se 5.2-3**
- 8-20 Winberg A**
Förläggning av ett förvar för använt kärnbränsle på stora djup – Sammanställning av för- och nackdelar.
SKB Djupförvar Projektrapport (i manuskript).
- 8-21 Kjellbert N, Johansson S**
Miljöaspekter på förläggning av ett djupförvar för använt kärnbränsle och annat långlivat avfall i Storumans kommun.
SKB Djupförvar Projektrapport PR 44-94-017, Stockholm, 1994.

- 8-22 Holm E (red)**
Socioekonomiska konsekvenser av ett djupförvar för använt kärnbränsle i Storumans kommun.
SKB Djupförvar Projektrapport PR 44-94-019, Stockholm, 1994.
- 8-23 Holm E, Lindgren U**
Förstudie Malå. Socioekonomiska konsekvenser vid lokalisering av ett djupförvar för använt kärnbränsle.
SKB Djupförvar Projektrapport PR D-95-001, Stockholm, 1995.
- 8-24 Fredriksson C**
Storuman inför tusenårsskiftet – ett omvärldsperspektiv.
SKB Djupförvar Projektrapport PR 44-94-020, Stockholm, 1994.
- 8-25 Fredriksson C**
Förstudie Malå. Omvärldsanalys – Malå i hjärtat av det riktiga Norrland.
SKB Djupförvar Projektrapport PR 44-94-034, Stockholm, 1994.
- 8-26 Olsson C**
Turism och kärnavfall i Storumans kommun.
SKB Djupförvar Projektrapport PR 44-94-013, Stockholm, 1994.
- 8-27 Nyberg L, Johnsdotter M, Lindgren G**
Turismens utveckling. Samlingsrapport.
SKB Djupförvar Projektrapport PR 44-94-036, Stockholm, 1994.
- 8-28 Johansson S**
Ett djupförvars inverkan på det rörliga friluftslivet.
SKB Djupförvar TPM 94-4471-04, Stockholm, 1994.
- 8-29 Welander L**
Referenser från större anläggningsprojekt.
SKB Djupförvar Projektrapport PR 44-94-021, Stockholm, 1994.
- 8-30 Se 4-2**
- 8-31 Se 1-20**
- 8-32 Se 5.5-1**
- 8-33 Se 5.5-2**
- 8-34 Se 5.5-3**
- 8-35 Se 5.5-4**
- 8-36 Se 5.5-5**
- 8-37 Se 5.5-6**
- 8-38 Whitaker et al.**
AECL strategy for surface-based investigations of potential disposal sites and the development of a geosphere model for a site.
SKB Technical Report TR 94-18, Stockholm, 1994.
- 8-39 Öhberg A, Pauli S, Ahokas H, Ruotsalainen P, Snellman M**
Summary report of the experiences from TVOs site investigations
SKB Technical Report TR 94-17, Stockholm, 1994.
- 8-40 Davison C C et al.**
The disposal of Canadas nuclear fuel waste: Site screening and site evaluation technology.
AECL-10713, COG-93-3, 1994.
- 8-41 Fairhurst C, Gera F, Gnirk P, Gray M, Stillborg B**
OECD/NEA International Stripa project 1980-1992. Overview Report. Volumes I-III.
SKB, Stockholm, 1993.
- 8-42 Summary of the international Stripa project. In SKB Annual Report 1992**
SKB Technical Report TR 92-46, Stockholm, 1992.
- 8-43 Almén K-E, Zellman O**
Äspö Hard Rock Laboratory. Field investigation methodology and instruments used in the pre-investigation phase, 1986-1990.
SKB Technical Report TR 91-21, Stockholm, 1991.
- 8-44 Wikberg P (ed); Gustafson 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, 1994.
- 8-45 Almén K-E, Olsson P, Rhén I, Stanfors R, Wikberg P**
Äspö Hard Rock Laboratory. Feasibility and usefulness of site investigation methods. Experiences from the pre-investigation phase.
SKB Technical Report TR 94-24, Stockholm, 1994.

- 8-46 Bäckblom, G, Gustafson G, Stanfors R, Wikberg P**
Site characterization for the Swedish Hard Rock Laboratory.
Proc NEA/SKI Symposium Stockholm, 14-17 May, 1990. OECD, Paris, 1990.
- 8-47 Gustafson G, Liedholm M, Rhén I, Stanfors R, Wikberg P**
Äspö Hard Rock Laboratory. Predictions prior to excavation and the process of their validation.
SKB Technical Report TR 91-23, Stockholm, 1991.
- 8-48 Bäckblom G, Gustafson G, Rhén I, Stanfors R, Wikberg P**
Results and experiences from the Äspö Hard Rock Laboratory Characterization Approach.
GEOVAL 94. Proc NEA/SKI Symp Paris, 11-14 Oct 1994. OECD/NEA, Paris, 285-295, 1994.
- 8-49 Se 1-2**
- 8-50 FOU-program 92**
Kärnbränsleavfallens behandling och slutförvaring. Detaljerat FoU-program 1993-1998.
SKB, Stockholm, 1992.
- 8-51 Cosma C, Juhlin C, Olsson O**
Reassessment of seismic reflection data from the Finnsjön study site and perspectives for future surveys
SKB Technical Report 94-03, Stockholm, 1994.
- 8-52 Se 4-6**
- 8-53 Använt kärnbränsle och radioaktivt avfall.**
Betänkande av Aka-utredningen.
SOU 1976:30,31 och 41.
- 8-54 FUD-program 92**
Kärnbränsleavfallens behandling och slutförvaring. Lokalisering av ett djupförvar.
SKB, Stockholm, 1992.
- 8-55 Se 1-22**
- 8-56 Förstudie Malå. Lägesrapport. Sammanfattning av hittills utfört arbete.**
SKB Djupförvar Projektrapport PR D-95-007, Stockholm, 1995.
- 8-57 Eng T (red)**
Översiktsstudie av kommuner med kärnteknisk verksamhet
SKB Djupförvar Projektrapport PR D-95-002, Stockholm, 1995.
- 8-58 Ekendahl A-M**
Transport av inkapslat radioaktivt avfall till djupförvar – System och säkerhet.
SKB Djupförvar TPM 94-4470-01, Stockholm, 1994.
- 8-59 Lindemalm P**
Transportsystem för avfall och bulkmaterial till djupförvar.
SKB Djupförvar TPM 94-4471-01, Stockholm, 1994.
- 8-60 Lindemalm P**
Transportmöjligheter till ett djupförvar i Storumans kommun.
SKB Djupförvar Projektrapport PR 44-94-012, Stockholm, 1994.
- 8-61 Lindemalm P**
Transportmöjligheter till ett djupförvar i Malå kommun.
SKB Djupförvar Projektrapport PR D-94-004, Stockholm, 1994.

Kapitel 9 – Program för djupförvar

- 9-1 Se 1-3**
- 9-2 Se 1-20**
- 9-3 Se 1-22**
- 9-4 Se 4-6**
- 9-5 Se 4-2**
- 9-6 Se 8-45**
- 9-7 Se 8-39**
- 9-8 Se 8-38**
- 9-9 Se 1-6**

Kapitel 10 – Program för säkerhetsanalyser m m

10-1 Se 4-11

10-2 Se 1-22

Kapitel 12 – Program för Äspölaboratoriet

12-1 Se 1-1

12-2 Äspö Hard Rock Laboratory Annual Report 1994.

SKB Technical Report TR 95-07, Stockholm, 1995.

12-3 Gustafson G, Liedholm M, Rhén I, Stanfors R, Wikberg P

Äspö Hard Rock Laboratory. Predictions prior to excavation and the process of their validation.

SKB Technical Report TR 91-23, Stockholm, 1991.

12-4 FUD-Program 92. Kärnkraftavfallets behandling och slutförvaring. Underlagsrapport Äspölaboratoriet.

SKB, Stockholm, September 1992.

12-5 Se 1-2

12-6 Se 8-45

12-7 Svensson U

Flow, pressure and salinity distributions around planned experimental sites at the Äspö Hard Rock Laboratory.

SKB Äspö HRL Progress Report PR 25-94-11, Stockholm, 1994.

12-8 Svensson U

Calculation of pressure, flow and salinity fields using measured inflow to the tunnel.

SKB Äspö HRL Progress Report PR 25-94-27, Stockholm, 1994.

12-9 Se 5.5-113

12-10 Se 5.5-111

12-11 Se 5.5-109

12-12 Se 5.5-74

12-13 Se 5.5-115

12-14 Se 5.5-114

12-15 Billaux D, Guérin F, Wendling J

Hydrodynamic modelling of the Äspö HRL. Discrete fracture model.

SKB Äspö HRL International Cooperation Report, ICR 94-14, Stockholm, 1994

12-16 Noyer M L, Fillion E

Hydrodynamic modelling of the Äspö Hard Rock Laboratory. ROCKFLOW code.

SKB Äspö HRL International Cooperation Report, ICR 94-15, Stockholm, 1994.

12-17 Barthelemy Y, Schwartz J, Sebti K

Hydrodynamic modelling of the original steady state and LPT2 experiments. MARTHE and SESAME codes.

SKB Äspö HRL International Cooperation Report, ICR 94-16, Stockholm, 1994.

12-18 Gustafson G, Ström S

Evaluation report on Task no 1, the LPT2 large scale field experiment.

SKB Äspö HRL International Cooperation Report (under framtagning).

12-19 Äspö Hard Rock Laboratory. Test plan for ZEDEX – Zone of Excavation Disturbance Experiment. Release 1.0.

SKB Äspö HRL International Cooperation Report, ICR 94-02, Stockholm, 1994.

12-20 Olsson O, Ben Slimane K, Davies N

ZEDEX – An in-situ study of the importance of the excavation disturbed zone to repository performance.

Proc. of the 6th High Level Radioactive Waste Management Conference, Las Vegas, Nevada, April 30-May 5, 1995. American Nuclear Society, La Grange Park, IL, USA.

12-21 Mazurek M, Bossart P, Eliasson T
Classification and characterization of water-conducting features at Äspö: Results of Phase I investigations.
SKB Äspö HRL Progress Report PR 25-95-03, Stockholm, 1995.

12-22 Bäckblom G, Olsson O
Äspö Hard Rock Laboratory. Program for tracer retention understanding experiments.
SKB Äspö HRL Progress Report PR 25-94-24, Stockholm, 1994.

12-23 Winberg A
Tracer Retention Understanding Experiments (TRUE). Test plan for the First TRUE Stage.
SKB Äspö HRL Progress Report PR 25-94-35, Stockholm, 1994.

12-24 Grenthe I, Stumm W, Laaksoharju M, Nilsson A-C, Wikberg P
Redox potentials and redox reactions in deep groundwater systems.
Chemical Geology 98, 131, 1992.

12-25 Se 5.5-155

12-26 Se 5.5-154

12-27 Se 5.5-158

12-28 Olsson O
Test plan for degassing of groundwater and two phase flow. Release 1.0.
SKB Äspö HRL Progress Report PR 25-94-34, Stockholm, 1994.

12-29 Geller J T, Jarsjö J
Degassing and two-phase flow – Pilot hole test report, 1994.
SKB Äspö HRL International Cooperation Report ICR 95-03, Stockholm, 1995.

12-30 Bäckblom G, Börgesson L
Programme for backfill tests and Äspö prototype repository to prepare for the deep repository of spent nuclear fuel in Sweden. Release 1.0.
SKB Äspö HRL Progress Report PR 25-94-36, Stockholm, 1994.

12-31 Se 8-15

12-32 Se 8-16

12-33 Börgesson L
Test plan for backfill and plug test in ZEDEX drift. Release 1.1.
SKB Äspö HRL Progress Report PR 25-95-16, Stockholm, 1994.

12-34 Se 8-41

12-35 Rosén L, Gustafson G
Suitable nearfield design. Stage 1. Application of a markov-bayes geostatistical model.
SKB Äspö HRL Progress Report PR 25-94-33, Stockholm, 1994.

Kapitel 13 – Alternativa metoder

13-1 Se 1-19

13-2 Jameson R A (Editor)
Proceedings of the specialist meeting on Accelerator-Driven Transmutation for Radwaste and other Applications. Swedish National Board for Spent Nuclear Fuel (SKN) – Los Alamos National Laboratory (LANL), Saltsjöbaden, Sweden, 24-28 June 1991. R A Jameson Editor. Report LA-12205-C or SKN report no 54, November 1991.

13-3 Skålberg M, Liljenzin J-O
Partitioning and transmutation, A review of the current state of the art.
SKB Technical Report TR 92-19, Stockholm, November 1992.

13-4 Gudowski W, Pettersson K, Thedéen T
Accelerator transmutation of wastes (ATW) – Prospects and safety.
SKB Technical Report TR 93-23, Stockholm, November 1993.

13-5 Skålberg M, Liljenzin J-O
Partitioning and transmutation, The state of the art. Nuclear Engineering International, Vol 38(463), pp 30-33, 1993.

13-6 Skålberg M et al.

SKB Technical Report (i manuskript), Stockholm, 1995.

13-7 Baudin G et al.

Overview of the French program in chemical separation and transmutation of minor actinides and long-lived fission products.

IAEA Proc Techn Com Meet Wien 29 Nov – 2 Dec 1993.
IAEA-TECDOC-783 p 37.

13-8 Mukaiyama T et al.

Partitioning and transmutation R&D program OMEGA and present status of the transmutation study at JAERI.

IAEA Proc Techn Com Meet Wien 29 Nov – 2 Dec 1993.
IAEA-TECDOC-783 p 75.

13-9 Kudryayavtsev E G

Analysis of the preliminary results of the Russian P&T research programme. Same Meeting.

IAEA Proc Techn Com Meet Wien 29 Nov – 2 Dec 1993.
IAEA-TECDOC-783 p 161.

13-10 IAEA

IAEA, Proc of a Techn Com Meet held in Wien 29 Nov – 2 Dec 1993.

IAEA-TECDOC-783.

13-11 Se 3-10

13-12 Juhlin C, Leijon B

Geoscientific appraisal to conditions at large depths – Project outline and deep borehole inventory.

SKB Djupförvar Projektrapport (i manuskript), Stockholm, 1995.

13-13 Leijon B et al.

Geoscientific appraisal to conditions at large depths – Compilation and evaluation of existing data.

SKB Djupförvar Projektrapport (i manuskript), Stockholm, 1995.

13-14 NEDRA

Characterization of crystalline rocks in deep boreholes. The Kola, Krivoy Rog and Tyrnauz boreholes.

SKB Technical Report TR 92-39, Stockholm, 1992.

Kapitel 14 – Rivning av kärntekniska anläggningar

14-1 International co-operation on decommissioning – Achievements of the OECD/NEA co-operative programme 1985-1990.

OECD/NEA, Paris, 1992.

14-2 Methodology and technology of decommissioning nuclear facilities.

IAEA Technical Report Series No 267, IAEA, Vienna, 1986.

14-3 SKB, Kärnkraftens slutsteg. Teknik och kostnader för rivning av svenska kärnkraftverk.

SKB, Stockholm, juni 1994.

14-4 Tor Stenberg

Heltanksstudie för Ringhals 1 och Ringhals 3.

SKB Arbetsrapport AR 94-30, Stockholm, januari 1993.

14-5 Simon R, Huber B

R&D for decommissioning in the European Communities – Present activities and future tasks.

Presented at the OECD/NEA/IAEA International Seminar on Decommissioning Policies, Paris, 2-4 October 1991.

14-6 Simon R et al.

Decommissioning of nuclear installations.

Proceedings of the International Conference on the Decommissioning of Nuclear Installations, Luxemburg, 26-30, September 1994. In print.

14-7 Se 1-23

***Kapitel 15 – Programmets
genomförande –
Osäkerheter i tids-
planen; kostnader***

15-1 Se 1-16

15-2 Se 1-22

15-3 Se 1-23

15-4 Se 1-1

15-5 Bilaga till följebrev från SKB till Statens
Kärnbränslenämnd den 27 september 1989
angående FoU-program 89. Se ref 1-2.

Forskningsinstitutioner, konsulter, entreprenörer m fl som medverkat i SKBs FUD-program under 1994

ABB Atom AB, Västerås	Geosigma AB, Uppsala
ABB Drives, Västerås	GeoVista AB, Luleå
ABB Fläkt, Stockholm	Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung, München, Tyskland
Abraxas Konsult, Stockholm	GIS-centrum, Stockholm
AECL, Whiteshell Research, Ottawa, Kanada	Golder Associates, Seattle, Washington, USA
Agrenius Konsult AB, Stockholm	Golder Associates, Göteborg
Anders Rasmuson KemTek, Mölndal	Golder Associates, Uppsala
Axel Johnsson Instrument AB, Solna	Grahl Media, Vallentuna
Boliden Contech, Skellefteå	Göran Steen Konsult AB, Danderyd
British Geological Survey, Nottingham, Storbritannien	Göteborgs universitet, Marin och Allmän Mikrobiologi, Göteborg
Caledon-Consult, Nyköping	Harwell Laboratory/AEA, Oxfordshire, Storbritannien
CAP Gemini Sogeti AB, Stockholm	Höganäs i Bjuf AB, Bjuv
CEA, IPSN, Cadarache, Frankrike	Ingenjörfirma Mats Nilsson, Stockholm
CENTEC, Luleå	Institutet för Metallforskning, Stockholm
CFE AB, Urban Svensson, Norrköping	Intera Information Technologies, Henley-on-Thames, Storbritannien
Chalmers Tekniska Högskola, Geologi, Göteborg	Intera Information Technologies SL, Cerdanyola, Spanien
Chalmers Tekniska Högskola, Kärnkemi, Göteborg	Intera Sciences, Henley-on-Thames, Storbritannien
Chemima AB, Täby	International development AB, Stockholm
Christopher Juhlin Consulting, Uppsala	IPA-KONSULT AB, Oskarshamn
Clay Technology, Lund	Itasca Geomekanik AB, Borlänge
Computervision Services AB, Stockholm	J&W Bygg & Anläggning AB, Lidingö
Conterra AB, Göteborg	JAA AB, Luleå
Conterra AB, Uppsala	JP-Engineering OY, Raisio, Finland
Drillcon Contracting AB, Boliden	Kemakta Konsult AB, Stockholm
Ekonomisk Byggnation AB, Österskär	Korrosionsinstitutet, Stockholm
EQE International Limited, Birchwood, Storbritannien	Kungl Tekniska Högskolan i Stockholm, Centrum för Säkerhetsforskning, Stockholm
Ergodata, Göteborg	Kungl Tekniska Högskolan i Stockholm, Kemisk Apparat- teknik, Stockholm
ES-konsult, Stockholm	Kungl Tekniska Högskolan i Stockholm, Kärnkemi, Stockholm
Eurofutures AB, Stockholm	Kungl Tekniska Högskolan i Stockholm, Mark- och vattenresurser, Stockholm
FEMTECH AB, Västerås	
Geo Research Center G.R.C., Stockholm	
Geokema AB, Lidingö	
Geokonsult Stille AB, Upplands-Väsby	
GeoPoint AB, Spånga	

Kungl Tekniska Högskolan i Stockholm, Materialvetenskap, Stockholm
 Kungl Tekniska Högskolan i Stockholm, Neutron- och Reaktor fysik, Stockholm
 Kungl Tekniska Högskolan i Stockholm, Oorganisk Kemi, Stockholm
 Kungl Tekniska Högskolan i Stockholm, Teknisk Geologi, Stockholm
 Kungl Tekniska Högskolan i Stockholm, Vattenvårdsteknik, Stockholm
 Kärnbörning AB, Nora
 LangeArt, Stockholm
 Linköpings universitet, Tema Vatten, Linköping
 Linköpings universitet, Kemi, Linköping
 Luleå Tekniska Högskola, Bergmekanik, Luleå
 Lunds Tekniska Högskola, Byggnadsteknik, Lund
 Lunds Tekniska Högskola, Kemisk Teknologi, Lund
 Lunds Universitet, Teknisk Geologi, Lund
 Malå Geoscience, Malå
 MBT Umwelttechnik AG, Hans Wanner, Zürich, Schweiz
 MBT Tecnologia Ambiental, Cerdanyola, Spanien
 Measurements Systems Scandinavia AB (MSS), Åkersberga
 Menon Consulting, Nyköping
 Mirab, Uppsala
 Mithögskolan i Östersund, Östersund
 MRM Konsult, Luleå
 MRQ Materialröntgen AB, Göteborg
 MRQ Materialröntgen AB, Oskarshamn
 NCC, Malmö
 NIS GmbH, Hanau, Tyskland
 OKG AB, Oskarshamn
 Projektstyrning AB, Stockholm
 R Allan Freeze Engineering, Inc., White Rock, Kanada
 Robert Maddock, Woking, Storbritannien
 Rock Store Design-ROX AB, Nacka
 ROX AB, Stockholm
 Roy Stanfors Consulting AB, Lund
 Rågård Konsult AB, Spånga
 Saanio & Riekkola Oy, Helsinki, Finland
 SAFETECH Engineering, Västerås
 Saltech AB, Solna
 Scandiaconsult Bygg- och Industriteknik AB, Stockholm
 Scottish Universities Research & Reactor Centre, Glasgow, Storbritannien
 Siab AB
 SKANSKA Stockholm AB, Danderyd
 SKANSKA Sydöst AB, Oskarshamn
 Starprog AB, Stockholm
 Steph Rock Consulting, Stockholm
 Stockholms universitet, Geologi, Stockholm
 Storumans Utvecklings AB, Storuman
 Studsvik EcoSafe, Nyköping
 Studsvik Material AB, Nyköping
 Studsvik Nuclear, Nyköping
 SveBeFo, Stockholm
 Sven Andersson, Brunnsbörning AB, Uppsala
 Svensk Anläggningsprovning AB, Stockholm
 Svensk Geofysik AB, Falun
 Sveriges Geologiska Undersökning, Göteborg
 Sveriges Geologiska Undersökning, Lund
 Sveriges Geologiska Undersökning, Malå
 Sveriges Geologiska Undersökning, Uppsala
 Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, Borås
 Sydkraft Konsult AB, Malmö
 Technical Research Centre of Finland, Helsinki, Finland
 Terra Tema, Linköping
 Terralogica AB, Gråbo
 The Welding Institute, Cambridge, Storbritannien
 Transnucleaire S.A., Paris, Frankrike
 Triumf Geophysics, Luleå
 Turismutveckling AB, Östersund
 Uddcomb Engineering AB, Karlskrona
 Umeå universitet, Umeå
 Université Louis Pasteur de Strasbourg, Frankrike
 University of Edinburgh, Dep. of Geology and Geophysics, Edinburgh, Storbritannien
 University of New Mexico, Dep. of Geology, Albuquerque, USA
 UPEC AB, Stockholm
 Uppsala universitet, Geologi, Uppsala

Vattenfall Energisystem AB, Stockholm

Vattenfall Engineering AB, Stockholm

Vattenfall HydroPower AB, Ludvika

Vattenfall HydroPower AB, Luleå

Vattenfall HydroPower AB, Stockholm

VBB VIAK AB, Göteborg

VBB VIAK AB, Luleå

VBB VIAK AB, Malmö

VBB VIAK AB, Stockholm

Ventilationstest, Stockholm

Vibrometic Oy, Helsingfors, Finland

Åbo University, Alf Björklund, Finland

ÅF-Energikonsult Stockholm AB, Stockholm

Örnsköldsviks Mekaniska Verkstad AB, Örnsköldsvik