



SKB

FoU-PROGRAM 86

Kärnkraftavfallets behandling och slutförvaring.

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

September 1986

I Allmän del

II Val av slutförvaringssystem

III Forskningsprogram 1987-1992

Kärnkraftavfallets behandling och slutförvaring.

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

September 1986

INNEHÅLLSFÖRTECKNING DEL I – III

Del I ALLMÄN DEL

FÖRORD

INLEDNING

- 1 FÖRUTSÄTTNINGAR
- 2 AVFALL FRÅN SVENSKA KÄRNKRAFTS-PROGRAMMET
- 3 ÅTGÄRDER FÖR ATT TA HAND OM RADIOAKTIVT AVFALL FRÅN KÄRNKRAFTVERKEN
- 4 ÖVERSIKT ÖVER PLANERAD FORSKNING OCH UTVECKLING

Referenser

Bilaga: Kort översikt över vissa legala krav

Del II VAL AV SLUTFÖRVARINGSSYSTEM

- 1 INLEDNING
- 2 FAKTORER SOM PÅVERKAR VAL AV PLATS OCH SYSTEM
- 3 BESKRIVNING AV NUVARANDE UNDERLAG
- 4 UNDERSÖKNINGAR SOM SKALL LEDA TILL VAL AV SYSTEM OCH PLATS

Del III FORSKNINGSPROGRAM 1987 - 1992

- 1 ALLMÄNT
- 2 TEKNISKA BARRIÄRER
- 3 GEOVETENSKAP
- 4 BIOSFÄRSSTUDIER
- 5 KEMI
- 6 SÄKERHETSANALYSER
- 7 INTERNATIONELLT SAMARBETE
- 8 ORGANISATION OCH GENOMFÖRANDE

Referenser

Bilaga: Remissbehandling och expertgranskning av KBS-3

INNEHÅLLSFÖRTECKNING DEL II

1	INLEDNING	7
2	FAKTORER SOM PÅVERKAR VAL AV PLATS OCH SYSTEM	9
2.1	Allmänt	
2.2	Förvarets säkerhetsmässiga funktion	
2.3	Analys av förvarets säkerhet	
2.4	Platsspecifika faktorer	
2.5	Systemspecifika faktorer	
2.6	Socio-ekonomiska faktorer	
3	BESKRIVNING AV NUVARANDE UNDERLAG	13
3.1	Underlag för platsval	
3.1.1	Allmänt	
3.1.2	Typområdesundersökningar	
3.1.3	Undersökningsmetodik	
3.1.4	Modeller	
3.2	Underlag för utformning	
3.2.1	Allmänt	
3.2.2	Principiell utformning och utförande	
3.2.3	Avfallsformer	
3.2.4	Kapsel	
3.2.5	Styrning av grundvattenflödet	
3.2.6	Kemiska förhållanden och kemisk konditionering	
3.2.7	Transport i fjärrzon	
4	UNDERSÖKNINGAR SOM SKA LEDA TILL VAL AV SYSTEM OCH PLATS	17
4.1	Översiktsplan	
4.2	Geovetenskaplig forskning	
4.2.1	Grundvattenrörelser	
4.2.2	Bergets stabilitet	
4.2.3	Underjordiskt berglaboratorium	
4.3	Typområdesundersökningar	
4.4	Utvärdering inför platsval	
4.5	Undersökningar rörande tekniska barriärer	
4.5.1	Allmänna principer	
4.5.2	Översikt av alternativstudier	
4.5.3	Modellutveckling och dataunderlag	
4.5.4	Teknikutveckling	
4.6	Utvärdering inför val av förvarssystem	

1 INLEDNING

Som framgått av del I syftar arbetsplaneringen till att en lokaliseringsansökan för ett slutförvar för långlivat radioaktivt avfall ska kunna lämnas in vid sekelskiftet.

Nuvarande arbetsläge är att genomförbarheten av en säker slutförvaring, baserad på idag tillgänglig teknik, är redovisad och accepterad av myndigheterna. I samband med detta arbete har ett antal möjliga förläggningsplatser studerats vad gäller de geologiska förutsättningarna för att åstadkomma säkra slutförvarsanläggningar. På samma sätt har ett antal möjliga tekniska barriärer studerats, som kan byggas in i slutförvaret i syfte att öka förvarets förmåga att skydda människan och hennes miljö från påverkan av de radionuklider som deponeras i förvaret.

För att bland möjliga utformningar av säkra slutförvar kunna välja ut den som ur olika aspekter är mest gynnsam, måste den fortsatta forskningen även

omfatta en utvärdering av alternativa metoder till tidigare redovisad hantering och slutförvaring. Detta överensstämmer med statsmakternas lagföreskrifter och direktiv. Syftet är att inte binda sig till viss metod förrän tillräckliga kunskaper vunnits om utformning och tillförlitlighet av olika tänkbara alternativ, samt att så länge som möjligt bibehålla flexibiliteten i slutförvaringssystemet för att kunna utnyttja tekniska landvinningar.

Fram till tidpunkten för en lokaliseringsansökan ska dock både plats och i förvaret ingående tekniska barriärer ha valts, så att ansökan kan baseras på en platsspecifik och optimerad anläggningsutformning.

2 FAKTORER SOM PÅVERKAR VAL AV PLATS OCH SYSTEM

2.1 Allmänt

Ett slutförvar för använt kärnbränsle i Sverige måste uppfylla av samhället givna säkerhetskrav. Allt radioaktivt avfall från kärnkraftsprogrammet skall kunna omhändertas med god ekonomisk och resursmässig effektivitet.

Säkerhetskraven syftar till att skydda människan och hennes omgivning mot skadlig påverkan från slutförvaringen. Slutförvarssystemet skall säkerställa att utsläppet av skadliga ämnen inte överstiger hygieniska eller radiologiska gränsvärden i människans miljö. Rimliga insatser skall därutöver göras för att nedbringa den totala belastningen på allmänheten. Målet är att förvarets långsiktiga effekter inte på ett väsentligt sätt skall förändra de radiologiska eller övriga förhållanden som naturligt föreligger i området.

Under anläggningsskede och driftsskede måste verksamheten genomföras på sådant sätt, att den uppfyller miljöskyddskraven och ger en god arbetsmiljö.

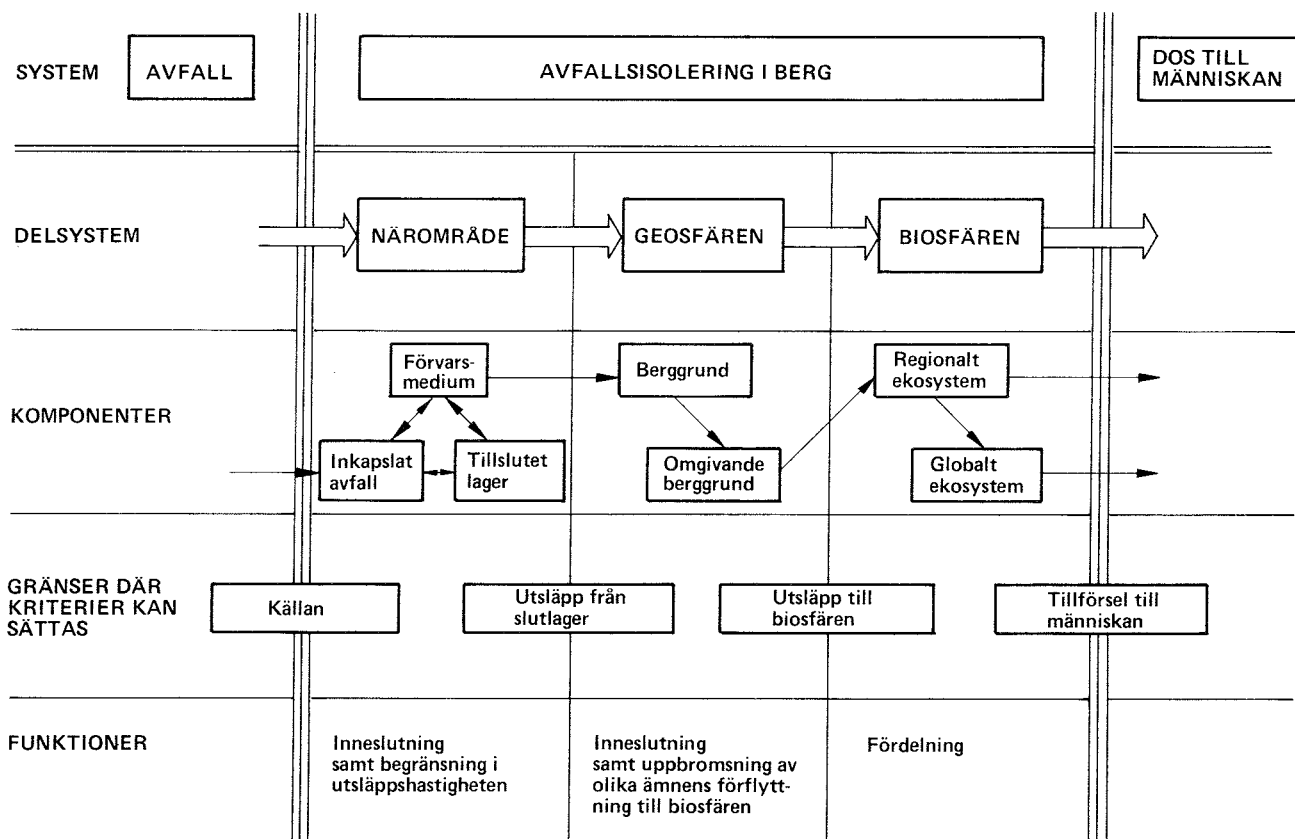
Den långsiktiga säkerheten och effektiviteten för ett slutförvar påverkas såväl av geosfärens och biosfärens naturliga förutsättningar vid platsen, som av de tekniska säkerhetsbarriärer som byggs in i förvaret. Figur 2-1 utgör ett schema över för-

varssystemet och där ingående delar. Pilarna visar kopplingen mellan olika systemdelar och den sekvens i vilken säkerhetsanalysen måste genomföras.

KBS-rapporterna redovisar exempel på utformning av förvar för högaktivt och långlivat radioaktivt avfall och deras säkerhet. Säkerhetsanalys-avsnitten redogör i detalj för hur säkerhetsbedömningen genomförts och hur olika faktorer påverkar säkerheten.

Hittills genomförda analyser av säkerheten hos olika förvarssystem, både utomlands och i Sverige, visar att en kombination av goda platsförhållanden och lämpligt valda tekniska barriärer i ett förvar kan erbjuda en långsiktig förvaring, som uppfyller även stränga normer för utsläppspåverkan. Eftersom säkerhet kan åstadkommas med olika tekniska eller naturliga barriärer erhålles ett optimeringsutrymme.

Nedan görs först en kort genomgång av förvarets säkerhetsmässiga funktion och det för säkerhetsanalysen väsentliga underlaget. Därefter diskuteras betydelsen av vissa plats- och barriärspecifika faktorer och socio-ekonomiska faktorer.



Figur 2-1. Systemschema över slutförvaring i kristallint berg.

2.2 Förvarets säkerhetsmässiga funktion

Under de förhållanden, som råder vid förvaring av radioaktivt avfall under grundvattenytan i svensk berggrund, kan radioaktiva ämnen endast påverka människan om de transporteras upp till biosfären med grundvatten eller om människan genom borrning eller andra åtgärder tar sig in i ett slutet förvar.

Information om förvarets läge, utformning och innehåll bör bevaras och förvaret bör placeras och konstrueras på sådant sätt att risken för ofrivilligt intrång minimeras.

Säkerheten mot utläckande radioaktiva ämnen kan uppnås genom att fördröja den tidpunkt vid vilken ett radioaktivt ämne kommer i kontakt med människan. Härvid reduceras avfallens farlighet genom avklingning. Säkerheten kan också uppnås genom att nuklidfrigörelsen sker långsamt eller att nukliderna fördröjs i transporten genom geosfären. Därigenom späds de utläckta nukliderna i grundvatten och ytvatten, vilket reducerar de maximala koncentrationer som kan uppkomma.

Så länge grundvattnet förhindras att komma i kontakt med avfallet sker ingen upplösning av radionukliderna i bränslet och avfallet är totalt isolerat. Vid förvaring under grundvattenytan utförs en sådan total isolering lämpligast som en vattentät kapsel kring avfallet. Vid torra förvarssystem måste ev grundvatten dräneras och isoleringstiden bestäms bl a av den tidsperiod, under vilken dräneringen bibehåller sin funktion.

Kapseln fullgör sin säkerhetsfunktion så länge den är intakt. Dess livslängd påverkas av kemiska och mekaniska förhållanden i närområdet och tillförseln av korrosiva ämnen via grundvattnet. Tillförseln av sådana ämnen kan begränsas genom lämplig utformning av förvaret eller genom tillsats av sorberande eller fällande ämnen, s k kemisk konditionering av närzonen.

Om avfallet kommer i kontakt med grundvatten påbörjas en laknings- och transportprocess som kan föra radionukliderna från förvaret till grundvattnet. Utlakningens hastighet styrs av avfallens egenskaper, vattenflöde och kemiska förhållanden i förvaret samt av den omgivande temperaturen och ev radiolysfenomen förorsakade av avfallet. Transporten i förvaret styrs av den hydrauliska konduktiviteten och diffusiviteten i materialen i närzonen och omgivande berg samt av de termiska gradienter och koncentrationsgradienter som utbildas.

När radioaktiva ämnen lämnat de av förvaret förändrade kemiska och hydrauliska förhållanden i närzonen, kommer en eventuell vidare transport att ske under förhållanden som föreligger naturligt i berggrunden. Sorption och utfällning på sprickytor liksom dispersion och indiffusion av radionuklider i bergmaterialet påverkas av mätbara förhållanden i berget som vattenkemi, spricksystemets karakteristika, sprickfyllnadsmineral, porositet, konduktivitet etc. De flesta ämnen fördröjs på vägen så att transporttiden för radionuklider är betydligt längre än för vatten.

Om och när radioaktiva ämnen från förvaret når biosfären kan de komma att ingå i olika näringskedjor. Både koncentrationshöjningar och utspädning kan förekomma. Hur mycket som slutligen kan nå människan beror på de naturliga förhållandena i ytvattnet och hur människan utnyttjar naturen.

Samtliga faktorer som på ovan angivna sätt påverkar förvarets inverkan på människan kan i viss mån styras. De naturliga förhållandena påverkas genom val av plats och närzonsförhållandena genom val av material och utformning av tekniska säkerhetsbarriärer. Vissa förvarskoncept kan dock bara åstadkommas i speciell geologi eller topografi.

2.3 Analysen av förvarets säkerhet

En analys av hur förvaret fungerar över långa tidsperioder kräver, att de i förvarssystemet ingående delarna karakteriseras (data) och den växelverkan som kan uppstå mellan komponenterna i förvarssystem och förlägningsplats beskrivs (modeller). Både data och modeller måste dessutom vara relevanta för alla de rimliga förhållanden, under vilka förvaret skall kunna fungera (scenarier). Prognosen över förvarets framtida funktion skall slutligen uttryckas i termer som överensstämmer med eller direkt kan jämföras med de normer som samhället ställt upp (kriterier).

Data av betydelse för analysen diskuteras närmare i avsnitten 2.4 och 2.5 uppdelade på geoanknutna och platsspecifika data respektive systemanknutna barriärspecifika data. Data skall dels ge kvantitativ information, dels också information om osäkerhet i mätningar eller om den naturliga variation som karakteriserar fenomenet ifråga.

Beräkningsmodellerna för analys av förvarets funktion måste ta hänsyn till både variationen i data och möjliga återkopplingsfenomen. Ur praktisk synpunkt innebär detta att de resulterande datormodellerna kan bli mycket stora och kräva extrem datorkapacitet. En förenkling av modellsystemen kan då bli nödvändig, speciellt om datormodelleringen skall kunna återge hur osäkerheter i indata påverkar konsekvenserna. Det måste kunna visas att både de vetenskapliga modeller som simulerar faktiska processer och eventuella förenklade analysmodeller, kan återge de i verkligheten förekommande och dominerande fenomenen. Detta sker genom att modellerna granskas, jämförs med andra modelluppsättningar och valideras mot experiment eller analoga naturliga system.

De scenarier som ligger till grund för valet av relevanta modeller skall återspegla dels de rådande förhållandena och deras naturliga utveckling med tiden, dels de större förändringar i tillstånd som med viss sannolikhet kan inträffa. Förändringarna kan exempelvis utgöras av långsiktiga förändringar i klimat, topografi, avrinning etc. Andra förändringar kan förorsakas av mänsklig verksamhet, som ändringar i matproduktion och jordbruk eller krig och försök att återta avfallet. Även oavsiktliga störningar av förvaret, som grunddrift eller djupborrningar, utgör scenarier vars sannolikhet och effekter måste bedömas. En tredje

typ av scenarier, som ofta används i säkerhetsanalys-sammanhang, är systemspecifika scenarier, där någon barriär antas felfungera. Sådana scenarier kan bl a belysa effekten av om misstag skett i tillverkningen, eller om förståelsen för sammanhangen varit bristfällig.

Kriterierna för vad samhället betraktar som tillräcklig säkerhetsnivå för ett slutförvar är slutligen avgörande både för val av förvarsplats och systemutformning. Acceptanskriterier kan uttryckas som högsta tillåtna dos till individer eller grupper, högsta tillåtna riskökning, krav på absolut inneslutning under viss tid etc. Det ankommer på samhället att välja acceptanskriterier, med hänsyn till sina ambitioner och resurser att skydda människor och miljö från skadlig påverkan.

2.4 Platsspecifika faktorer

De naturliga förhållandena på en plats har betydelse för hur lämplig platsen är för att härbärgera ett slutförvar. De platsspecifika egenskaperna måste utvärderas tillsammans på det sätt som de råkar uppträda på platsen. Olika egenskaper kan dock vara mer eller mindre utslagsgivande för platsens lämplighet och med hänsyn till möjliga utformningar av förvaret.

En grundläggande förutsättning är att förvaret förläggs i ett område som är så stabilt, att inga avgörande förändringar av geohydrologiska eller kemiska förhållanden i förvarets berggrund behöver förväntas i tidsperspektivet upp emot 1 miljon år. Om regionala sprickzoner och kända svaghetszoner undviks, torde de flesta urbergsområden i Sverige uppfylla detta krav, så snart förvaret förläggs till ett djup större än 200 à 300 m.

Grundvattenrörelserna i geosfären påverkas av hydrauliska gradienter föranledda av topografi, densitetsskillnader eller termiska förhållanden och av bergets och spricksystemens karakteristika som hydraulisk konduktivitet, porositet och geometriska utsträckning. Grundvattenflödet kring ett förvar kan således påverkas genom att förvaret förläggs med hänsyn till ovanstående parametrar.

Användning av långtidsstabla strömningsbarriärer i kapselns omgivning, eller införandet av en sk hydraulisk bur där vattenflödet leds förbi förvaret, ger möjligheter att i viss utsträckning frigöra sig från mycket stränga krav på låg vattenomsättning i berggrunden.

Grundvattnets omsättning och kemiska sammansättning, samt bergets och sprickmineralernas geokemiska egenskaper, avgör när kapselmaterialet har rotat igenom och i vilken takt radioaktiva ämnen blir tillgängliga för transport i grundvattnet. Avgörande för både kopparkapselns långtidsbeständighet och för en långsam bränsleupplösning är att det föreligger en reducerande miljö i förvaret. En annan faktor som i hög grad påverkar lösligheten av många för säkerheten relevanta radionuklider är pH. Därutöver finns ett antal specifika ämnen som kan påverka lösligheten av något speciellt ämne, genom exempelvis bildning av

fasta faser med låg löslighet eller genom bildning av lösliga komplex.

I de genomförda analyserna har närzonskemin främst påverkat omgivningssäkerheten via utlakningshastighet och via fällning av radionuklider vid den antagna redoxfronten.

Transporten av radionuklider i geosfären styrs av grundvattenrörelserna i berget samt av den kemiska sammansättningen hos bergmatris, sprickmineral och grundvatten. Nuklidernas indiffusion i bergmatrisen och den kemisk-fysikaliska växelverkan mellan nukliderna och bergets mineral fördröjer nuklidernas transport. Samtliga dessa fenomen styrs av platsspecifika geohydrologiska egenskaper.

I de hittills genomförda typområdesundersökningarna har områdena valts med hänsyn till att de geologiska egenskaperna ska vara så gynnsamma som möjligt. Bl a har man eftersträvat jämn topografi och enhetlig bergart, som dessutom inte bedöms kunna bli värdefull som råvara. Områdena har också valts så att större markerade sprickzoner omger ett inre block av berg med låg vattenföring.

Det är vidare önskvärt att området är så lättolkat vad gäller sprickzoner, bergarter och geometri att realistiska modeller kan ställas upp. Området måste också ha en utsträckning som möjliggör att aktuella avfallsmängder kan deponeras och att förvaret kan förläggas till ett djup som utesluter inverkan av rimligt sannolika yteffekter.

Utöver de faktorer som är definierade av platsen kvarstår ett antal fria parametrar. Ett exempel är förvarets utformning, som ger en möjlighet att påverka t ex temperatur och utrymmesbehov. Ett annat exempel är förvarets djup, som inom vissa gränser ger en möjlighet att påverka grundvattenomsättning, och det minimiavstånd som avfallsämnen måste tillryggalägga i berget för att nå biosfären. I vissa områden syns möjligheten finnas att förlägga förvaret i praktiskt taget stagnant grundvatten.

Hittills gjorda studier visar, att acceptabel säkerhet är möjlig att uppnå på ett flertal förläggningsplatser i Sverige och att det även är möjligt att utnyttja områden, där inte samtliga platsspecifika säkerhetspåverkande faktorer är maximalt gynnsamma.

2.5 Systemspecifika faktorer

Eftersom de kemiska betingelserna för slutförvar i hög grad bestäms av det berg som finns tillgängligt i Sverige, måste det tekniska barriärsystemet anpassas till dessa. Material i kapslar, kemiska buffertmaterial, vattenströmningsbegränsande skikt etc måste väljas så att växelverkan mellan de platsspecifika och systemspecifika faktorerna är gynnsam och kan förstås och kvantifieras. Förvaret får därför inte byggas så att de speciella förhållanden som skapats i närzonen väsentligt kan förändra sådana naturliga förhållanden i berggrunden, på vilka förvarets långsiktiga säkerhet är baserad.

Genom förvarets utformning kan vissa av de parametrar som påverkar långtidssäkerheten för ett förvar

styras. Betydelsefulla effekter fås av att den geometriska utformningen och deponeringshålets läge definierar längden på strömningsvägarna till närmaste sprickzon. Fördelningen av avfall i berget påverkar vidare temperaturen i förvaret. Berguttaget medför avlastningszoner kring tunnlar och schakt, vilket tillsammans med ev tätande injekteringar och pluggningar påverkar grundvattnets lokala strömningsvägar i förvaret.

Samtliga dessa effekter är starkt system- och plats-specifika och kan i vissa avseenden enbart behandlas som statistiska fördelningar. De metoder som tillämpas för att pröva om en position för ett deponeringshål verkligen skall utnyttjas påverkar också den minimikvalitet som kan tillskrivas berget kring deponeringshålen i en säkerhetsanalys.

Av avgörande betydelse för masstransporten mellan avfallskapsel och det rörliga grundvattnet är återfyllnadsmaterialet i utrymmet mellan kapsel och bergvägg. Vattenomsättning och diffusivitet kan påverkas genom att strömningsbarriärer av olika material och tjocklek införs.

För läckage tillgängliga mängder radionuklider kan begränsas genom dimensionering och materialval för kapslar kring avfallet.

Det bör åter påpekas att hittills gjorda erfarenheter visar att lämpliga kombinationer av naturliga och tekniska barriärer kan ge en betydande översäkerhet. I en optimeringsprocess innebär detta, att ett acceptabelt slutförvar på en extremt gynnsam förläggningsplats skulle kunna konstrueras med endast begränsade tekniska barriärer eller, omvänt, ett mindre gott förvarsläge skulle kunna kompenseras av mer omfattande tekniska barriärer.

2.6 Socio-ekonomiska faktorer

Det är uppenbart att befolkningens tilltro till säkerhetsbedömningarna för ett slutförvar, och deras upplutning kring samhällets normer för vad som är en lämplig säkerhetsnivå för sådana anläggningar, är av vikt för genomförbarheten av ett slutförvar i nationell enighet.

Kravet på social acceptans kan föranleda att slutförvaringssystemet konstrueras med större säkerhetsmarginaler än vad som vore nödvändigt, baserat på rena säkerhetsanalyser eller på den praxis som etablerats i samhället för att undvika övriga riskformer. I valet mellan två typer av likvärdiga tekniska barriärer kan den, som i allmänhetens ögon syns säkrare, vara att föredra. Systemlösningar, som nått en internationell acceptans genom att de tillämpats i andra länder, kan vara att föredra framför "skräddarsydda" lösningar, anpassade till platsspecifika omständigheter.

Av största vikt för en allmän acceptans av säkerhetsvärderingarna torde dock den granskningsprocedur och kvalitetskontrollprocess vara, som tillämpas på analysen av förvarets funktioner och på konstruktionen och uppförandet av anläggningen. Det är väsentligt att den görs tillgänglig för insyn. Detta bör

gälla samtliga steg i processen – från forskning, konceptuell utveckling, platsval och systemval till lokaliseringstillstånd, konstruktion, byggande och drift.

Då slutförvaringen utgör ett projekt av storleksordningen 10 miljarder kronor är det uppenbart att en stor betydelse måste tillskrivas de samhällsekonomiska och företagsekonomiska faktorerna. De ekonomiska faktorerna hänför sig främst till bygg- och driftkostnader för anläggningarna, resursförbrukning (exempelvis behov av material och mark), effekter på arbetsmarknad och kapitalmarknad samt behov av service o dyl under bygg- och driftskedet.

Vad gäller bygg- och driftkostnader torde stora ekonomiska vinster vara att hämta i enklare hantering eller konstruktioner, föranledda av systemförändringar, bättre funktionsanalysmetoder eller bättre dataunderlag.

Slutligen är lokaliseringen av stor ekonomisk betydelse. Läget påverkar dels behovet av transporter och deras längd, dels behovet att bygga ut infrastrukturen kring anläggningen av t ex kraftförsörjning, teknisk service, bostäder, skolor etc.

3 BESKRIVNING AV NUVARANDE UNDERLAG

Ett omfattande arbete har under de senaste tio åren utförts i olika länder för att klarlägga möjligheterna till säker slutförvaring av högaktivt avfall i geologiska medier och att utveckla lämpliga förvarsutformningar.

Det underlag som för närvarande föreligger i Sverige baseras vad gäller det geologiska underlaget på ett 10-tal typområdesundersökningar, omfattande ytstudier och borrhningar ner till mellan 500 och 1000 m djup. Internationellt utgör detta ca hälften av världens platsspecifika information om djup kristallin berggrund, lämpad för slutförvaring av radioaktivt avfall. Övrigt material kommer främst från Finland, Frankrike, Kanada, Schweiz, Storbritannien och USA.

För förvarsutformningen i stort har de svenska insatserna koncentrerats på att i detalj studera ett fåtal förvarskoncept, som utgjort underlag för redovisningarna av genomförbarheten. Andra länder har studerat andra utformningar, anpassade till landets egna förutsättningar vad gäller avfallsformer, geologi, mängder m m.

Parallellt med studier av möjliga utformningar och förläggningsplatser har en utveckling skett av den grundläggande kunskapsbasen samt av instrument och analysmetodik. Inom många områden pågår sådan utveckling oberoende av insatserna på avfallssidan.

Huvuddelen av det totala underlag som för närvarande föreligger i Sverige finns redovisad i den serie av tekniska rapporter som SKB publicerat. Genom internationellt samarbete, främst inom IAEA och OECD/NEA, samt genom formellt eller informellt informationsutbyte, har SKB också tillgång till det underlag som tagits fram i andra länder.

I detta kapitel diskuteras på ett övergripande sätt underlaget för framtida val av förläggningsplats och utformning av förvarssystemet. I del III redovisas underlaget i större detalj som utgångspunkt för områdesvisa FoU-insatser för perioden 1987-1992.

3.1 Underlag för platsval

3.1.1 Allmänt

De svenska typområdesstudierna har huvudsakligen varit inriktade på berggrund av granit och gnejs.

Forskningen har nu avancerat så långt att i huvudsak följande kan fastslås:

- De problem som är av dominerande betydelse för förvarets långsiktiga säkerhet är i huvudsak identifierade.
- Instrument som möjliggör noggrann mätning av flertalet väsentliga parametrar har utvecklats.
- Modeller och beräkningsmetoder är utvecklade så att de komplicerade förlopp som påverkar säkerheten kan kvantifieras eller att deras maximala effekter kan visas vara begränsade.

Samtidigt är det möjligt att peka på specifika frågor, där kunskapen behöver utvecklas ytterligare för att motsvara de framtida behoven. Exempel på sådana är radarmätningar, modellering av grundvattenrörelser samt statistisk metodik för sampling, bearbetning och utvärdering av data.

På basis av typområdesundersökningarna kan man konstatera att det finns möjlighet att hitta många platser i Sverige, där de geologiska förutsättningarna är lämpliga för anläggning av ett slutförvar.

3.1.2 Typområdesundersökningar

Typområdesundersökningarna har främst inriktats på studier av:

- berggrundens storskaliga sprickighet,
- berggrundens hydrauliska egenskaper,
- grundvattnets kemiska sammansättning,
- bergarternas och sprickmineralernas kemiska egenskaper.

Data har samlats in och bildat underlag för beräkningar av det tredimensionella grundvattenflödet och härtill kopplade beräkningar av nuklidspridning i berget. Tolkningen av förekommande sprickzoners geometri ger också underlag för en schematisk inplacering av ett tänkt slutförvar i de undersökta områdena.

Undersökningarna har följt ett standardprogram som anpassats till lokala förhållanden. Därigenom är det möjligt att beskriva de undersökta områdena på ett likartat sätt och även att jämföra dem sinsemellan. Vid valet av typområden beaktas bl a topografi, förekomst av större sprickzoner, bergartsfördelning och bergmassans struktur, förekomst av malmer och grundvattenkapacitet i närbelägna bergborrade borrar.

De områden, som valts ut för närmare undersökning, omfattar en yta av 4-5 km². Där utförs ytundersökningar som omfattar kartläggning av bergarter, sprickor och sprickzoner. Samtidigt görs geofysiska markmätningar med olika metoder för att man ska få en indikation på bl a eventuella sprickzoner under jordtäckta partier och dessa zoners lutning.

I djupundersökningarna ingår såväl hammarborrhål som kärnborrhål. Hammarborrhålen, som är relativt grunda (ner till 200 m), syftar främst till att belysa sprickzoners karaktär och orientering. Inom varje område har upp till 16 kärnborrhål ned till mellan 500 och 1000 m borrats. De har riktats för att ge maximal information om den djupa bergmassans geologiska och hydrologiska egenskaper samt om sprickzoners karaktär och vattenföring.

Bestämning av bergets hydrauliska konduktivitet har gjorts genom vatteninjektionstester, där vatten pressats in i avgränsade sektioner i borrhålen. I anslutning till detta mäts också det naturliga vattentrycket på olika nivåer i borrhålen.

För att belysa grundvattnets kemiska egenskaper och hur dessa varierar har vattenprover från olika

djup i vissa borrhål analyserats. Ett omfattande grundvattenkemiskt material har härigenom insamlats från de studerade undersökningsområdena. Speciellt sedan ett mobilt system för kemisk analys i fält har tagits i bruk, med bl a borrhålssonder för mätning av Eh och pH, har mer tillförlitliga data erhållits.

På grundval av topografi, spricksystemens geometri samt uppmätta konduktiviteter och hydrauliska gradienter, har en beskrivande modell upprättats för varje typområde. Genom numeriska beräkningar har därefter grundvattenstryckets variationer inom området erhållits. Härav har sedan grundvattenflöden, flödesriktningar och transport beräknats.

Förutom dessa undersökningar på utvalda typområden har ett omfattande underlag av intresse för avfallsförvaring framkommit intill Forsmarks- och Oskarshamnsverken, bl a i anslutning till anläggningsarbetena för SFR och CLAB. Det måste betonas att de genomförda undersökningarna är översiktliga. Den slutliga utformningen av ett förvar kräver högre detaljeringsgrad.

Undersökningarna på de olika gnejs-granit-områdena visar en relativt enhetlig bild vad gäller vissa fundamentala parametrar såsom grundvattenkemi och hydraulisk konduktivitet i bra berg. I andra avseenden är platsernas geologi väsentligt olika, t ex antal och utsträckning av vattenförande sprickzoner. Det jämförelsematerial som sålunda finns tillgängligt beträffande denna typ av bergarter bedöms i detta skede vara tillräckligt vad avser antalet platser. Vissa kompletterande, ytterligare undersökningar bör dock genomföras på någon eller några av platserna.

De kommande mer detaljerade undersökningarna inom geområdet syftar till att förbättra kvantifieringen så att materialet bättre kan utnyttjas i den slutliga optimeringen av förvarssystemet.

De undersökningar som gjorts i gabbro ger inte tillräckligt underlag för att bedöma om denna bergart skulle kunna väljas för ett slutförvar i Sverige. På ett område, Taavinunnanen, borrades ett borrhål och bergarten var här genomsatt av granitgångar. Hittills gjorda erfarenheter av gabbro tyder på att homogena kroppar som är tillräckligt stora för ett slutförvar är svåra att finna. Borrningar på ett gabbro-område, Kolsjön, inleddes hösten 1985, men fick avbrytas på grund av protester.

Trots allsidig och ambitiös forskning är det dock inte uteslutet att vissa fenomen kommer att förbli svåra att kvantifiera. Dessa problem måste som tidigare hanteras genom att införa gränssättande eller ogynnsamma antaganden i säkerhetsanalysen eller genom att utforma förvaret så att inverkan av icke kvantifierbara faktorer minimeras eller undanröjs.

3.1.3 Undersökningsmetodik

Vad gäller dataunderlag bedöms att en fortsatt tillämpning av nuvarande standardundersökningsprogram på allt fler granit/gnejs-områden, endast skulle öka kunskapsunderlaget marginellt. Eftersom forskningen alltmer kommer att inriktas på att ge underlag till ett verkligt förvar behövs utökade möjligheter till detaljerade studier under jord. Utveckling av metodik

för dessa detaljerade undersökningar kan genomföras vid ett underjordiskt berglaboratorium, anlagt i ett för slutförvaret karakteristiskt berg.

3.1.4 Modeller

För att kunna beräkna transporten av eventuellt upplösta avfallsämnen, måste matematiska modeller byggas upp för grundvattenrörelserna. Vid hittills genomförda analyser har områden i km-skala modellerats som om berget och större sprickzoner består av ett stort antal porösa element med olika hydraulisk konduktivitet. De vattenflöden i förvarsområdet som på så sätt erhållits har antagits gå direkt till en sprickzon i berget (på 100 m avstånd). Sprickzonerna antas sedan snabbt kunna leda grundvattnet med utläckta nuklider fram till biosfären.

Erfarenheter från undermarksbyggnad och typområdesundersökningarna visar dock att stora partier av bergmassan är fullständigt tät och att vattenflödet ofta sker i diskreta, lokala sprickzoner. Eftersom områden med hög vattenomsättning kan undvikas vid kapselinplaceringen, bör en modellutveckling här kunna medföra att bergmassan kan utnyttjas mer optimalt.

3.2 Underlag för utformning

3.2.1 Allmänt

Utformning och utförande av en förvarsanläggning och de tekniska barriärer som finns där har varit anpassad till de miljöer som återfinns i de studerade granit/gnejs områdena. Funktionsanalyserna har syftat till att belysa de skyddseffekter som på ett ovedersägligt sätt kan visas vara möjliga att uppnå. Detta innebär att vissa kombinationer av material och utföranden har undersökts i detalj, medan andra näraliggande alternativa utformningar inte alls behandlats.

Nedan diskuteras det befintliga kunskapsunderlaget rörande:

- principiella utformningar,
- avfallsmatrisen,
- kapslar,
- styrning av grundvattenflödet,
- kemisk konditionering,
- nuklidtransport i geosfären.

I tillämpliga fall diskuteras underlaget i de olika delarna med hänsyn till:

- studerade koncept,
- kunskapsunderlag och förståelse för processer och växelverknningar,
- modeller och dataunderlag,
- utförande och kvalitetskontroll.

3.2.2 Principiell utformning och utförande

De svenska studierna av slutförvarssystem avser förvaring under grundvattenytan i kristallint berg och på sådant djup att förvaret kan betraktas som skyddat för

även omfattande yttlig påverkan vid krig eller glaciation. I KBS-rapporterna redovisas förvarsutformningar som baseras på sådan utspridning av avfallet att termiska effekter och kemisk påverkan från förvaret inte väsentligen förändrar den omgivande berggrundens möjligheter att skydda biosfären från olämpliga effekter av slutförvaret.

Geometriskt mera koncentrerade förvarsutformningar, exempelvis WP-Cave, har bl a studerats av SKN. Härvid isoleras ett större, förändrat bergområde från omgivningen via tekniska barriärer.

De komponenter som ingår i de nämnda fallen är likartade. Avfallet omges av en kapsel för att under viss tid isolera det från grundvatten. Grundvattnets växelverkan med kapsel eller avfall begränsas av strömningshindrande och diffusionsbegränsande material och av kapselns placering i förhållande till vattenförande sprickor. Kapselns beständighet kan ökas och radionuklidernas löslighet kan begränsas genom kemisk konditionering av närzonen.

Studierna av förvarsutformningen styrs till viss del av de principiella systemlösningarna. Bearbetning av förvar baserade på tunnlar djupt i berggrunden har genomförts i Sverige, liksom i USA, Kanada och Schweiz. Avfallet kan placeras i specialborrade deponeringshål eller i själva tunneln.

Varianter av förvarsutformningar, där avfallskapslar förläggs i grupper i speciella utrymmen eller tät sekvens i ett fåtal långa borrhål, har inte bearbetats i detalj.

Den detaljerade fördelningen av avfall i ett förvar liksom förvarets form och djup är, i alternativ med tunneldeponering, parametrar som relativt fritt kan varieras. Detaljerade studier av den växelverkan som genom grundvatten sker mellan berggrundens mineral och komponenterna i förvarets närzon har enbart genomförts för granit och gnejs.

Tillverkningsteknik för barriärer har studerats och provats för koppar och aluminiumoxidkapslar samt bentonit- och bentonit/sand-fyllningar.

3.2.3 Avfallsformer

Huvuddelen av undersökningarna på högaktivt avfall avser förglasat avfall från upparbetning. Studier av denna avfallsform har pågått i ett par decennier och genomförts i många länder, se vidare avsnitt 7.5 i del III.

Studier av använt kärnbränsle som avfallsform började långt senare och har hittills i huvudsak gjorts i Kanada, USA och Sverige. De svenska resultaten avser i huvudsak BWR-bränsle, de amerikanska PWR-bränsle och de kanadensiska CANDU-bränsle. Alla tre bränsletyperna är urandioxid kapslad i zircaloy medan utbränningsgraden varierar avsevärt. Studier av avfallsmatrisens löslighet redovisas i avsnitt 2.3 i del III.

Vad gäller UO_2 -matrisens stabilitet och förmåga att kvarhålla radionuklider har ett antal försök i olika typer av lakvatten och med en varaktighet upp till några år genomförts.

Modeller som beskriver erhållna lakresultat är under framtagning, men har ännu inte nått en nivå som

är tillräcklig för att de skall kunna användas i säkerhetsanalysen. I avsaknad av sådana har säkerhetsbedömningarna baserats på de intressanta nuklidernas löslighet i närzonen och i geosfären.

3.2.4 Kapsel

En kapsel kring avfallet fyller ett flertal funktioner. Den håller samman bränslet i hanteringsenheter av lämpliga dimensioner. Den kan utgöra en strålskärning för personalen under hanteringsskedet och den skyddar samtidigt bränslet mot omgivningpåverkan. Kapseln utgör dessutom en barriär, som under viss tid hindrar grundvattnet att komma i kontakt med avfallet.

Kapselmateriell som studerats i Sverige är främst koppar, men också titan, bly och aluminiumoxid, samt i begränsad omfattning även järn/stål och titanoxid. Kopparstudierna visar att i den miljö som förekommer på förvarsdjup i kristallin berggrund kan vägg-tjocklekar ner till 5 cm ge fullständig isolering upp i miljonårsskala.

Kritiska faktorer för isoleringstiden för kopparkapslar är förekomsten av korroderande ämnen i grundvattnet, t ex sulfidjoner, möjligheterna för dessa att nå kapselytan och graden av inhomogenitet i korrosionsangreppet. Kapselstudierna redovisas i avsnitt 2.4 i del III.

Möjligheterna att bestämma andra kapselmateriels förmåga att isolera avfallet har i tidigare studier begränsats av vissa problemställningar. För titan och aluminiumoxid har det varit svårt att klart bevisa att det ej förekommer fördröjt brott i materialet, förorsakat av långsam tillväxt i små oupptäckta defekter. För järn har det varit svårt att kvantifiera den takt, med vilken vätagalstrande korrosion kan ske. Under de senare åren har material om järnkapslars funktion i granitiskt berg och i närvaro av bentonit redovisats bl a av NAGRA.

3.2.5 Styrning av grundvattenflödet

I Sverige, liksom i många andra länder, har bentonit-lera utgjort det material som i första hand studerats för att åstadkomma ett hinder mot vattenströmning i spalten mellan kapsel och berg. Detta har främst berott på dess plasticitet och låga hydrauliska konduktivitet samt materialets förmåga att svälla vid vattenupptagning. Bentonitens pH-buffrande egenskaper och jonbytesförmåga har tillsammans med dess stora stabilitet även under geologiska tidsperioder varit andra grunder till det stora intresset. Buffertmaterial behandlas vidare i avsnitt 2.5 i del III.

Efter långa serier med laboratorieexperiment, avslutade med storskaliga in-situ-försök i naturlig miljö, torde bentonitens användbarhet vara klart påvisad. En strömingsfri omgivning kan således skapas kring en kapsel. Detta medför att eventuell transport av radioaktiva ämnen från avfallet till det rörliga grundvattnet måste ske genom diffusion.

Modeller för materialets funktion och stabilitet har uppställts och validerats med försöksdata till en acceptabel nivå. Huvudinriktningen för de fortsatta studierna är att fastställa bl a temperaturgränserna för

materialiet. Metodik för hantering och applicering har testats bl a vid Stripa.

Andra möjliga material för motsvarande ändamål är mindre studerade.

Möjligheten att åstadkomma konstgjorda strömningsvägar i berget i syfte att leda vattnet förbi förvaret kan ge en lägre vattenomsättning i förvaret. Långtidsstabiliteten i sådana strömningsvägar har ännu inte analyserats.

3.2.6 Kemiska förhållanden och kemisk konditionering

Bilden av den kemiska sammansättningen av grundvatten i granit-gnejs är relativt enhetlig och klar medan en osäkerhet för grundvattnet i andra bergarter kvarstår. Analysen av de kemiska sambanden i förvaret visar att den kemiska parameter som dominerar säkerhetsfunktionen i förvaret är grundvattnets redoxpotential. En annan parameter som i hög grad påverkar lösligheten av många för säkerheten relevanta radionuklider är pH. Därutöver finns ett antal specifika ämnen som kan påverka lösligheten av något speciellt ämne genom exempelvis bildning av fasta faser med låg löslighet eller genom bildning av lösliga komplex.

Genom styrning av den kemiska miljön i närområdet kan takten i kapselns korrosion och bränslets upplösning påverkas.

Den kemiska konditionering som studerats har främst varit effekten av bentonit och betong i förvaret. Båda ger en pH-påverkan. Vissa studier har också gjorts av möjligheten till Eh-kontroll via tillsatser av mineral innehållande II-värd järn (ex vivianit).

Eventuella störningar, orsakade av radioaktiviteten i förvaret, olika material i förvaret och eventuellt infiltrerande yttligare vatten, neutraliseras av berget efter en viss tid. Bergets förmåga att neutralisera dylika störningar och den hastigheten med vilken störningar utjämnas har främst studerats vad gäller redoxpotential.

Dataunderlag och modeller som beskriver den kemiska specieringen i dessa skeden har utvecklats på många håll i världen. Modeller som PHREEQE och EQ3/6 finns sedan något år tillgängliga i landet. En sammanställning av termodynamiska data pågår i OECD/NEAs regi. Studier av naturliga system som utgör analogier till förhållandena vid ett slutförvar för använt bränsle pågår i syfte att verifiera de matematiska modellerna och kommer att utgöra en viktig del i det framtida programmet, se avsnitt 5.4 i del III.

3.2.7 Transport i fjärrzon

Om radionuklider frigörs till närzonen kan de också, med viss fördröjning, nå det rörliga grundvattnet.

Som nämnts i föregående avsnitt finns en möjlighet att de kemiska förhållandena i närzonen skulle kunna medföra en påverkan nedströms förvaret. Utsträckningen av denna plym av påverkan beror bl a på närzonens kemi och det omgivande bergets tillgängliga buffertkapacitet. En annan viktig parameter för detta är den grad av stråkning som vattenflödet i bergets

spricksystem har. Genomförda modelleringar av nuklidtransporten har baserats på empiriska data, främst från Finnsjö-området, som visar att grundvattenströmningen i genomsnitt sker i var femte spricka.

Radionuklidernas förmåga att diffundera in i bergets sprickytor är ett fenomen som starkt fördröjer utläckta ämnens transport i geosfären. En förutsättning för att radionuklider skall kunna diffundera in i bergmatrisen kring sprickorna är att både berg och sprickfyllnad har ett sammanhängande mikroporsystem. Evidens på detta har erhållits från laboratorieexperiment och från försök i Stripa.

Vad gäller avfallsämnenas tendens att sorbera på olika mineraltyper har ett stort kunskapsunderlag insamlats, främst från laboratorieförsök. Dataunderlaget inom detta område syns tillräckligt med hänsyn till de relativt enkla modeller som utnyttjas. En vidareutveckling måste främst ske genom att den s k sorptionen uppdelas i mer grundläggande fenomen som utfällning-mineralisering, jonbyte, utbytesreaktioner etc.

Matematiska modeller av nuklidtransporter har utvecklats i samband med KBS-studierna. Ytterligare valideringar pågår och kommer att fortsätta genom laboratorieförsök, genom in-situ-försök och genom utvärderingen av naturliga analogier.

4 UNDERSÖKNINGAR SOM SKA LEDA TILL VAL AV SYSTEM OCH PLATS

4.1 Översiktsplan

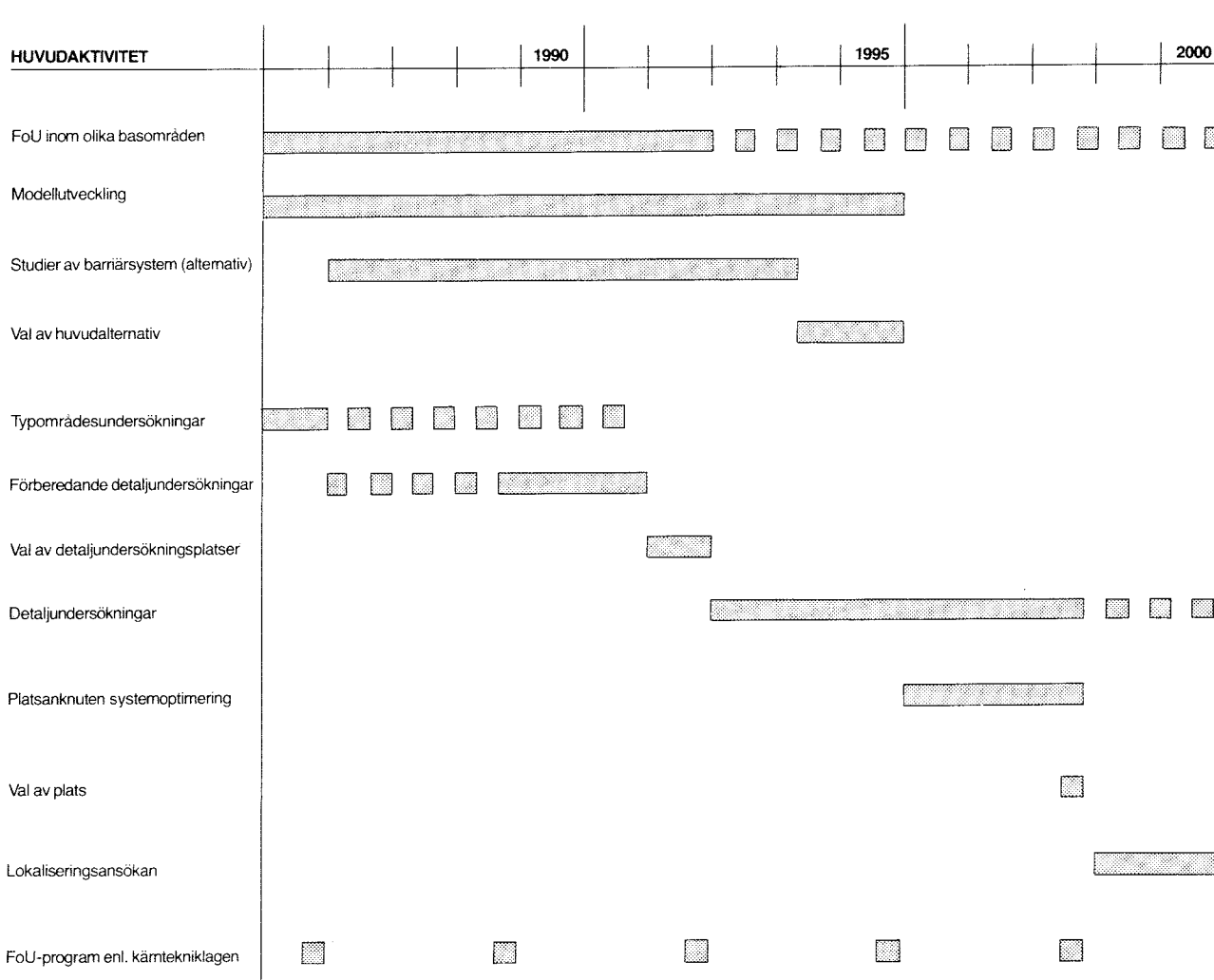
I avsnitt 4.3 i del I redovisas en översiktlig tidplan för de insatser som måste genomföras inför byggandet av ett slutförvar för använt kärnbränsle i Sverige. Av denna framgår att en lokaliseringsansökan avses bli inlämnad till år 2000.

De åtgärder, som erfordras för att välja system och plats för slutförvaret, att dimensionera barriärerna samt att analysera och redovisa systemets säkerhet, måste på ett strukturerat sätt genomföras under tidsperioden till år 2000. Nedan redovisas den arbetssekvens som utgör den ram inom vilka de enskilda insatserna skall passa in, se Figur 4-1.

Som framgår av del I bedöms ett slutförvar djupt i kristallin berggrund som det enda realistiska alternativet för ett slutförvar i Sverige. Förvaret måste utformas så att de säkerhetsbefrämjande barriärerna är anpassade till de förhållanden som berggrunden erbjuder.

Då de platsanknutna förutsättningarna för ett slutförvar till stor del är givna genom den svenska berggrundens egenskaper, måste den successiva fokuseringen börja med att ett fåtal potentiella förläggningsplatser i början av 1990-talet väljs ut för detaljerade studier. För områden som kan bli aktuella för en lokaliseringsansökan år 2000 bör dessa studier inte påbörjas senare än 1993. Under detta skede av platsgallring kan sannolikt också en viss utgallring av alternativa barriärutformningar göras.

I huvudsak bibehålls dock alternativbredden i barriärstudierna ända fram till mitten av 1990-talet. De sista åren av perioden bör studier av barriäralternativen koncentreras på analyser av ett antal integrerade förvarssystem, dvs på den växelverkan som erhålls mellan dels de olika barriärkomponenterna, dels mellan barriärsystemet som helhet och den omgivande geosfären. Vid slutet av perioden bedöms så mycket grundläggande information om plats specifika data



Figur 4-1. Översiktlig tidplan för FoU fram till lokaliseringsansökan för slutförvar.

och barriäralternativ vara framme att en eller ett fåtal utformningar kan väljas.

Perioden 1996-1998 är avsatt för en platsspecifik optimering av en slutförvarsanläggning på de en eller två lämpligaste platserna, varpå en preliminär säkerhetsrapport tas fram under 1998-99 som underlag för en lokaliseringsansökan.

Efter det skede där platsdata och barriärdata blivit allt mer detaljerade och samfunktionen av olika parametrar blir en huvudfråga i forskningsarbetet kommer behovet av kontrollerande och validerande in-situ-försök i representativ berggrund att öka. För detta ändamål bör ett underjordiskt berglaboratorium projekteras i god tid. Tunnelldrivning/schaktsänkning kombineras med metodutveckling för detaljstudier och vissa valideringsexperiment för prognoserande modeller.

De insatser för alternativutvärderingar, kunskapsuppbbyggnad, modellering osv som diskuteras i de följande avsnitten kan ha mycket olika angelägenhetsgrad. De som bedöms vara tillräckligt prioriterade för att ingå i planen för 1987 – 1992 redovisas i del III. Den kunskap som framkommer genom forskningsinsatserna kan föranleda omprioriteringar och förändringar av FoU-programmet.

En successiv fokusering av FoU-insatsen görs i takt med att vägledande information kommer fram. För att myndigheterna ska kunna ha en insyn i verksamheten erfordras en löpande uppföljning, där granskningen inte bara omfattar underlaget och besluten för gallring eller prioritering. En dialog måste även upprätthållas med myndigheterna om de successiva justeringar av FoU-inriktningen som erfordras för att underlaget ska vara relevant och detaljerat redovisa de för säkerheten väsentliga parametrarna.

I praktiken framstår tre perioder som mera betydelsefulla för fokuseringsprocessen än andra. Den första är valet av ett fåtal detaljundersökningsplatser 1990-1992. Den andra är framtagningen av ett eller några få integrerade tekniska barriärssystem under perioden 1994-1996. Den tredje är valet av plats och system för säkerhetsanalysen ca 1998.

Det förutsätts att en praxis etableras för myndighetskontakterna under dessa skeden. En detaljerad plan för frekvens och former för den tekniska informationen under platsgallringsfasen bör i samarbete med berörda parter tas fram under perioden 1987-1989.

Metoderna för den platsspecifika optimeringen, som skall påbörjas ca 1996, och innehållet i den preliminära säkerhetsrapport, som utgör grund för lokaliseringsansökan, kommer att diskuteras först i framtida forskningsprogram.

4.2 Geovetenskaplig forskning

SKB avser i kommande forskningsarbete att utveckla det geologiska och geohydrologiska underlaget till säkerhetsanalysen.

Målen för den fortsatta geovetenskapliga forskningen är bl a att:

- vidareutveckla metoder för att ta fram geodata av vikt för val av plats och utformning av ett slutförvar,
- identifiera och lösa problem som bedöms vara vitala för säkerhetsanalysen,
- kvantifiera de mekanismer som är relevanta för säkerhetsanalysen.

4.2.1 Grundvattenrörelser

I hittills genomförda säkerhetsanalyser har man infört stora säkerhetsmarginaler vid beräkning av grundvattenströmningen. Skälet är betydande osäkerheter i modeller och data. Bl a är kunskapen om stråkning och kanalbildning av grundvattenflödet i vattenförande sprickor bristfällig och det saknas tillräckliga data för att modellera nuklidspredning i sprickzoner.

En vidare utveckling av geohydrologiska modeller, i 10 m skala närmast förvaret och i skalan 100 – 1 000 m fram till sprickzoner, kommer att genomföras så att större hänsyn kan tas till lokala sprickmönster. Utveckling av geohydrologiska modeller kommer bl a att ske inom ramen för Stripa-projektet, se vidare avsnitt 7.3 i del III. Förutom valideringsexperiment kommer omfattande insatser att göras för att öka förståelsen kring kanalströmning.

I samband med schaktsänkningen vid Underground Research Laboratory (URL) i Kanada pågår ett större valideringsförsök av grundvattenmodeller. Oberoende grupper utför modellberäkningar av hur en schaktsänkning påverkar grundvattenförhållandena. Uppmätta förändringar ger sedan möjlighet att validera olika modeller. SKB deltar i detta arbete som kommer att ge erfarenhet för liknande försök vid det planerade berglaboratoriet.

Förutom deltagande i de internationella projekten kommer SKB att driva egna geohydrologiska projekt, bl a i anslutning till SFR. Erhållna mätdata kommer att användas för att vidareutveckla och validera de geohydrologiska modellerna. Även grundvattnets sammansättning som funktion av tiden kommer att analyseras för att få en bild av vattenomsättningen. Erfarenheterna bedöms värdefulla för planering av detaljundersökningar vid ett slutförvar.

I brist på modeller och data för att kvantifiera grundvattnets rörelser i sprickzoner antogs i säkerhetsanalysen i KBS-3 att en radionuklid som når fram till en sprickzon omedelbart också når markytan. En utökning av kunskapen inom detta område bedöms kunna avsevärt förbättra realismen i beskrivningen av grundvattenrörelserna.

Sprickzonsundersökningar genomförs med syfte att:

- utveckla och pröva metoder för lokalisering och karakterisering av sprickzoner,
- öka datamängden om sprickzoner och deras egenskaper,
- modellera grundvattenflöde och nuklidtransport i sprickzonen.

4.2.2 Bergets stabilitet

I ett långsiktigt perspektiv är förvarets säkerhet beroende av den omgivande berggrundens stabilitet. Tolkningen av mekanismer och jämförelser mellan aktiva och lugna områden underlättas om förståelsen för de storskaliga mekanismerna kan ökas.

Den seismiska aktiviteten i Sverige är mycket låg och jordskalven har liten magnitud. Större rörelser efter den senaste istiden har emellertid kunnat konstateras i ett antal zoner. Det är angeläget att utvärdera huruvida dessa rörelser har skett i gamla rörelsezoner eller om ny uppsprickning kan följas genom en bergplint.

De konsekvenser som rörelser i berggrunden kan få på olika bergplintars mekaniska och konduktiva egenskaper kommer att studeras.

4.2.3 Underjordiskt berglaboratorium

För att från typområdesundersökningarna komma vidare i forskningen krävs mer detaljerade kunskaper om de geologiska förhållandena. Etableringen av ett berglaboratorium på någon plats med lämpliga geologiska förutsättningar och geologiskt ostörda förhållanden förväntas kunna tillföra geovetenskaperna en väsentligt förbättrad kunskapsmassa. Den detaljundersökningsteknik som senare skall användas på platser aktuella för slutförvar kan utprovas.

Ett berglaboratorium innebär samtidigt en utomordentlig möjlighet att utveckla de metoder och validera de modeller som används som underlag till säkerhetsanalysen. Berglaboratoriet kan också användas för storskaldeförsök, som referensplats för studier av olika alternativ för utformning av förvar, in-situ-försök, m m, se vidare avsnitt 4.5.4 i del I.

4.3 Typområdesundersökningar

De utförda undersökningarna enligt standardprogrammet och de planerade kompletteringarna av dessa ger en översiktlig bild av de undersökta områdena. För att förbättra den tektoniska och geohydrologiska bilden av de olika områdena bör i några av de tidigare undersökta områdena kompletterande studier genomföras. Aktuella undersökningsmetoder är radarmätningar i enstaka borrhål eller mellan borrhål, reflexionsseismik, spänningsmätningar, interferenstester och spåröversök.

Då en kustnära förläggning ur säkerhets- och transportsynpunkt betraktas som gynnsam kan det bli aktuellt att undersöka bl a sådana områden under åren 1990–1992.

Typområdesundersökningarna planeras omkring år 1990 vara framme vid en ny fas. Ett par områden skall till 1993 väljas ut för detaljerad geologisk karakterisering. Målet är att erhålla ett detaljerat dataunderlag för säkerhetsanalyser som skall ligga till grund för valet av plats och system.

De detaljerade undersökningarna kommer att innefatta sänkning av ett schakt eller tunneldrivning ned till förvarsdjup. Uppläggningsen kommer att baseras

på erfarenheter bl a från URL och från uppföljningsprogrammet vid SFR. Det underjordiska berglaboratoriet ger, som redan framhållits, möjlighet till utveckling av metoder för detaljundersökningarna.

4.4 Utvärdering inför platsval

Förlägningsplatsen för ett slutförvar ska tillsammans med de tekniska barriärerna ge förvaret två avsedda säkerhetsfunktioner:

- Fördröja tidpunkten då avfallsämnen kan börja läcka ut från förvaret eller den tid då de kan nå biosfären, så att avfallets toxicitet reduceras genom avklingning av nuklider med kortare halveringstider.
- Begränsa den takt med vilken långlivade nuklider löses ut från förvaret eller når biosfären, för att reducera de maximala koncentrationer som kan uppkomma i människans miljö.

Som framgått av kapitel 2 och 3 visar de analyser som genomförts under senare tid att det i Sverige finns platser som väl uppfyller de krav som kan ställas på en god förlägningsplats. Detta innebär att även andra för samhället väsentliga faktorer kan vägas in vid val av lokalisering.

För att en plats ska vara lämplig för lokalisering av ett slutförvar för långlivat radioaktivt avfall måste den uppvisa ett antal egenskaper som är gynnsamma för de två säkerhetsfunktionerna.

Vid utvärderingen av en sådan plats är följande faktorer av intresse:

- Geologisk stabilitet är ett grundläggande krav för att tillåta prognoser av vattenflöden och vattenkemi i den tidsskala som säkerhetsfunktionerna har betydelse (dvs i hundratals år).
- Låg och långsam vattenomsättning ökar livslängden på sådana kapselmaterier, vars nedbrytning styrs av upplösning eller tillförda korroderanter och minskar takten i upplösningen av bränslematris och eventuella fällningar.
- Vattenkemin påverkar kapsellivslängd och löslighet genom effekterna på närområdeskemin. I fjärrområdet styr den specieringen av de upplösta ämnena.
- Bergets och sprickornas mineralsammansättning påverkar sorptionen av radionuklider och buffrar grundvattnets kemi.
- Bergartens och sprickfyllnadens porositet och diffusionsegenskaper påverkar graden av indiffusion i berget och bergets buffrande egenskaper.
- Bergmassans sprickighet och andel av sprickorna som är vattenförande påverkar storleken av den bergyta som är tillgänglig för sorption av radionuklider.
- Sprickzonernas utsträckning och geometri påverkar flödessituationen och transportvägarna för grundvatten och radionuklider och avgör dessutom hur stort förvar som ett givet område kan härbärgera.
- Biosfärens grundvattenrecipient har en stor inverkan på de maximala individdoser som kan uppstå i förvarets närhet.

Analysen av lämpligheten av ett förvarsläge måste väga in samtliga dessa faktorer, dels med hänsyn till deras inbördes betydelse, dels med hänsyn till de tekniska barriärer som kan komma att behövas. Inom vissa gränser kan materialval och dimensionering/utformning av de tekniska barriärerna anpassas till rådande platspecifika förhållanden. Vissa barriärutformningar kan dock ställa krav på förläggningsplatsens egenskaper.

I praktiken innebär detta att platsutvärderingen måste genomföras med hänsyn till möjliga tekniska barriärer. Analysen får då karaktären av en säkerhetsanalys, om än något förenklad.

Analysen har två uppgifter, dels att fastställa om den aktuella platsen överhuvudtaget kan erbjuda en tillräcklig säkerhet med hänsyn till de tekniska barriärer som finns tillgängliga, dels att väga säkerhetsrelaterade faktorer för att möjliggöra jämförelser.

Platser med goda naturliga spridningsbarriärer torde i allmänhet komma att kräva mindre påkostade system av tekniska barriärer för att uppnå samhällets acceptans än platser med ogynnsamma naturliga förhållanden. En optimering av plats och system möjliggörs härvid genom att platsanknutna, sociala och ekonomiska faktorer kan vägas mot kostnaden av erforderliga tekniska barriärer.

Ett slutförvar måste på ett tillfredsställande sätt fylla sin uppgift, dels under de troliga förväntade förhållandena i dess omgivning, dels även vid ett antal mindre troliga situationer som dock med viss sannolikhet kan uppkomma. I jämförelse med tidigare säkerhetsanalyser, där syftet var att fastställa en övre gräns för möjliga effekter vid de mest ogynnsamma förhållandena måste vid platsval en större vikt läggas vid troliga scenarier. Genom detta undviks att jämförelsen domineras av mycket osannolika händelser, som på grund av att de är svåra att modellera måste hanteras med konservatism. Jämförelsekriterier baserade på risk (konsekvens x sannolikhet) har diskuterats internationellt.

Platsjämförelserna genomförs fortlöpande. I början av 1990-talet genomförs en samlad utvärdering av då befintligt underlag för valet av områden för detaljundersökningar.

För att möjliggöra platsutvärderingar måste därutöver följande insatser prioriteras:

- Analysmetodik för jämförelserna skall utvecklas så att man förutom deterministiska analyser även kan genomföra probabilistiska analyser av förvarets funktion.
- De matematiska modellernas kvalitet och validitet ska vidareutvecklas. Försök att kvantifiera modellernas tillförlitlighet eller osäkerhet kommer att göras.
- Det platspecifika dataunderlaget ska bearbetas i syfte att definiera både troliga värden och parametrarnas övre och undre variationsgränser.
- Alternativ för tekniska barriärer kommer att sammanställas.
- För analysen väsentliga omgivningsförutsättningar och eventuella förändringar i dessa kommer att sammanställas.

- Jämförelsekriterier och acceptanskriterier måste diskuteras med berörda myndigheter.

Det underlag som planeras komma fram under 90-talets första år ska utgöra grunden, dels för val av ett par platser för de geologiska detaljundersökningarna, dels utgöra en referens för prioriteringen av alternativstudierna för de tekniska barriärerna som samtidigt pågår, se vidare avsnitt 4.5.

4.5 Undersökningar rörande tekniska barriärer

4.5.1 Allmänna principer

Behovet av ett brett underlag av alternativa slutförvarsmetoder inför ett slutgiltigt val av förvarssystem gäller såväl platser som system för tekniska barriärer och förvarsutformning. På grund av att de detaljerade platsundersökningarna kräver att man går ner med schakt eller tunnlar till förvarsdjup kommer dessa studier att vara tidskrävande. Detta innebär att antalet platser måste begränsas 1990-1992 för att ett fullständigt material ska föreligga för platsval i tid till lokaliseringsansökan år 2000. Motsvarande krav på en tidig fokusering av arbetet föreligger inte för val av tekniska barriärer. En reduktion av alternativbredden bör dock göras när valet av platser för de detaljerade platsundersökningarna har gjorts. I huvudsak kan flexibiliteten bibehållas fram till att samfunktionsanalyserna av de olika komponenterna och omgivande miljö visar att vissa alternativ är klart mindre gynnsamma än andra.

Begreppet alternativ kan uppfattas på många sätt. Alternativen kan dels utgöras av vissa integrerade förvarsutformningar (exempelvis KBS-3 och NAGRAs koncept), dels utgöras av förvar innehållande vissa bestämda komponenter (som kopparkapselalternativ eller järnkapselalternativ). Barriärerna kan dessutom varieras på en mångfald olika sätt genom utformning och dimensionering. Likaså kan anpassningen till platsen ske utifrån många olika grundalternativ. Tar man även hänsyn till att förvarsdjup, bergarter m m kan variera så erhålls ett mycket stort antal möjliga varianter för slutförvaring i det svenska arberget. Studier av dessa måste genomföras på ett någorlunda rationellt sätt om man vill få underlag för en optimal dimensionering av slutförvaret.

Det har visat sig vara fruktbart för alternativbreddningen att fokusera insatserna mot de olika alternativa komponenter som kan ingå i ett system. Eftersom komponenter, som ingår i vissa utformningar, ofta också kan kombineras med andra komponenter till nya förvarsutformningar, blir resultaten av en till synes snävt målinriktad forskning tillämpliga på ett flertal utformningsalternativ.

Emellertid kan vissa systemutformningar medföra speciella randvillkor för de ingående komponenterna. I praktiken måste således alternativstudierna drivas i ett iterativt förfarande. Studiet av vissa principutformningar föranleder att vissa komponentstudier prioriteras. Dessa kan sedan åter föranleda omvärderingar av de systemutformningar som är möjliga osv.

Arbetsgången i studiet av alternativutformningar är i huvudsak att först föra upp kunskapen om ingående komponenters funktion till en sådan nivå att dess säkerhetsmässiga roll kan definieras. Därefter utvärderas deras totala funktion i växelverkan med andra komponenter och berggrund och en jämförelse mellan olika alternativ görs så att ett säkert och effektivt totalsystem för en given plats kan väljas.

Slutligen måste teknik för tillverkning, applicering och kvalitetskontroll anpassas och eventuella demonstrationsförsök genomföras.

I genomgången av alternativ måste vissa prioriteringsgrunder tillämpas, dels för att tidsplanera de olika arbetsinsatserna, dels för att rangordna alternativen.

För tidsplaneringen av insatserna kommer en prioritering att göras på följande grunder:

- Potentiell säkerhetsbefrämjande effekt.
- Generell tillämpbarhet i olika barriärkombinationer.
- Enkel teknik för tillverkning/applicering.
- Potential för ekonomisk effektivitet.
- Tillgång till kunskapsunderlag och expertis.

En bedömning av de insatser som är nödvändiga för att kunna modellera komponentens funktion och kvantifiera dess effekt kommer också att vara av vikt vid tidsplaneringen. Även frågan om hur väl insatsen passar in i den pågående eller framtida forskningsstrukturen är betydelsefull.

Vid bedömningen av potentialen för säkerhetsfunktion och ekonomisk effektivitet kommer redan studerade komponenter att vara normgivande för vad som kan utgöra tillräcklig potential.

4.5.2 Översikt av alternativstudier

En genomgång av olika möjliga alternativa system och förläggningsprinciper har gjorts i en speciell underlagsrapport: "Kärnkraftavfallets behandling och slutförvaring. Alternativa slutförvaringsmetoder". Nedan ges en översikt av olika barriärtyper och alternativ för deras utformning.

Kapselmaterial (KBS-studier: Cu, Pb/Ti, Al₂O₃).

- Passiva material - titan.
- Korroderande material - kolstål.
- Icke metalliska material - Al₂O₃, TiO₂.

Strömningshinder (KBS-studier: sand/bentonit, kompakterad bentonit).

- Hydraulisk bur.
- Tätinjektering av berg.
- Strömningstått lerskikt (bentonit o liknande).
- Betongkringgjutning.
- Vattenundanträngning med gas.

Kemisk konditionering av närområdet (KBS-studier: vivianit).

- Styrning av redox-potential och redoxbuffertkapacitet.
- Styrning av pH och karbonathalt.
- Tillsats av sorbentmaterial.
- Tillsats av utspädande material.

Förutom alternativa komponenter i de tekniska barriärerna kan barriärernas eller förvarets tekniska utformning och vissa specifika principutformningar utgöra klara alternativ som måste utvärderas, exempelvis:

- Torrförvar.
- Djuphålsdeponering.
- WP-cave.
- Olika förvarslayout.
- Kapseltillverkningsmetodik.
- Samdeponering av olika radioaktiva avfallsformer.

Samtliga alternatividéer bör utvärderas med hänsyn till de fördelar och de nackdelar de kan ha. De studier, som är nödvändiga för att erhålla en tillräcklig kunskapsbas för utvärdering, måste initieras om alternativet bedöms som intressant.

Följande lista upptar ett antal sådana forskningsinsatser som krävs för en belysning av olika alternativ som kan bli aktuella med de förutsättningar som fn gäller i Sverige. Insatserna diskuteras ur tidplaneringssynpunkt och på en detaljerad utförandenivå i del III under de olika ämnesområdena.

Undersökning av naturliga förhållanden.

- En genomgång av bedömningar av kvarvarande landhöjning för att utröna möjligheter till en förvarsplacering som under viss tid garanterar att ev utsläpp hamnar i ett salt eller bräckt hav.
- En undersökning av förekomsten av en eventuell övergångszon för bergets sprickighet vid ca 1200 - 1500 m djup.

Undersökningar av närmiljön vid avfallet.

- Effekten av temperaturer över 100°C på buffertmaterial och berg i närzonen studeras för att fastslå gränserna för tillåtlig temperaturbelastning i förvaret.
- Den kemiska betydelsen av samdeponering av olika avfallstyper ska utredas.
- En systematisk genomgång av effekten av att använda betong i förvaret på viktiga närzons- eller geosfärsprocesser
- Radiolysofrågorna ska vidarebearbetas som underlag för val av kapseltjocklek.

Spridningsförhindrande åtgärder.

- En systematisk genomgång av olika former av "getters" eller kemiska buffertmaterial påbörjas, inklusive deras effekt på systemet i övrigt och geosfären.
- Uppbyggnaden och effekten av grundvattenstyrning ska studeras. Studierna bör bli kopplade till sprickzonsprojektet och fokusera på långtidseffekter.
- Studierna rörande injektering inriktas på långtidsfunktion och möjliga växelverkaner av olika material med övriga komponenter i förvarssystemet.
- Studier av alternativa kapselmaterial, deras degraderingsprocesser och deras växelverkan i förvaret.

Utformning och utförande.

- Olika metoder för tillverkning av intressanta alternativa barriärkomponenter ska studeras alltefter som de visar sig funktionsmässigt eller ekonomiskt attraktiva.

- En genomgång ska göras av olika möjliga utföranden och utformningar av förvaret och de ekonomiska eller funktionsmässiga konsekvenserna av dem ska belysas.

Resultaten av olika insatser kommer successivt att användas för att initiera nya studier eller för prioritering av kommande studier.

Uppenbart ogynnsamma alternativ kommer att gallras ut i alternativgenomgången och detaljeringsgraden i studierna kan successivt ökas för gynnsamma alternativ.

4.5.3 Modellutveckling och dataunderlag

Parallellt med alternativstudierna måste verksamheten inom de olika forskningsområdena fortsätta att fördjupa förståelse och kunskap som en grund för att identifiera, modellera och kvantifiera relevanta processer i förvaret.

För att bevisa genomförbarheten kan det vara tillräckligt att kunna fastslå att uppkomna konsekvenser är begränsade. Vid en jämförelse av säkerhetsfunktionen av olika alternativa komponenter eller deras utformning ställs dock större krav på att komponentens sannolika funktion är kvantifierad. Säkerhetsmarginaler och förenklande antaganden ska inte behöva tillämpas till den grad att väsentliga funktionskillnader försvinner.

I KBS-3-studien redovisas i en separat lista exempel på förenklande men ogynnsamma antaganden och svårkvantifierade säkerhetsmarginaler. En exemplifiering av dessa och andra områden, där en vidare utveckling torde kunna minska behovet av pessimistiska förenklingar eller svårkvantifierade säkerhetsmarginaler, görs nedan.

- Förekomst av fasta uranfaser med låg löslighet i närområdet.
- Möjligheterna att, eventuellt med kemisk konditionering, kunna begränsa en eventuell redoxfronts utbredning till buffertmaterialen närmast kapseln.
- Medfällningsfenomen och irreversibel mineralisering.
- Kinetiken för vissa geokemiska och andra kemiska processer.

Dessa och liknande utvecklingsinsatser, liksom också behovet att kvantifiera osäkerheter i både data och analyser, diskuteras under forskningsområdena i del III.

Eftersom kärnbränsle, grundvatten och kristallin berggrund förekommer i alla alternativa förvarsutformningar, utgör en vidare utveckling av kunskapen om dessa komponenter och deras samverkan en utgångspunkt för förståelsen av de processer som påverkar övriga delar. Prioriteringar inom områden för önskvärd kunskapsutveckling baseras i huvudsak på hur känslig förvarets totala säkerhet är för variationer i parametrar eller modeller för de olika processerna samt på en bästa bedömning av utvecklingspotentialen inom de olika områdena.

4.5.4 Teknikutveckling

Utöver de grundläggande tekniska genomförbarhetsbedömningar som ingår i studiet av olika alternativa förvarsutformningar kommer en utveckling och anpassning av teknik behöva genomföras för vissa alternativ. Teknikutvecklingsinsatserna kommer i huvudsak att kunna definieras först efter de initiala alternativgenomgångarna.

Huvudparten av sådana insatser förväntas vara knutna till behandlingsstationen för använt bränsle men vissa kan behöva genomföras i slutförvarliknande miljö. En samordning kommer därför att genomföras med annan försöksverksamhet vid det underjordiska berglaboratoriet.

4.6 Utvärdering inför val av förvarssystem

Processen att fokusera forskningsinsatserna från en bred alternativgenomgång till en enda platsspecifik optimerad slutförvarsanläggning har översiktligt skisserats i avsnitt 4.1 ovan samt i avsnitt 4.3 i del I.

Gallringen mellan alternativa systemutformningar för slutförvaret måste på samma sätt som val av platser för detaljundersökningar baseras på modellberäkningar av möjliga förvarsutformningar och betydelsen av de studerade alternativa komponenterna i dessa totala system. Detta innebär att analysmodeller och metoder för genomförandet av analyserna måste utvecklas och anpassas till behovet av alternativjämförelser och rangordning, se kapitel 6 i del III.

Målsättningen för de olika insatserna som syftar till att skapa alternativunderlaget är att fram till ca 1995 ha tagit fram ett tillräckligt dataunderlag som tillåter samfunksanalys mellan platsegenskaper och förvarets olika tekniska barriärkomponenter.

Tidplaneringen för genomförandet av alternativstudierna måste anpassas till huvudtidtabellen. I ett tidigt skede fram till ca 1990 måste således de kopplingar som finns till platsspecifika förhållanden klarläggas, så att platsgallringen kan göras i medvetande om eventuella krav eller restriktioner från olika alternativa barriärutformningar.

Under den närmaste treårsperioden kommer de jämförande analysernas genomförande att planeras och nödvändig detaljering av utvecklingsinsatser göras.

