



SKB

SR 95

Mall för säkerhetsrapporter med beskrivande exempel

December 1995

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING AB

BOX 5864 S-102 48 STOCKHOLM

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

SR 95

**Mall för säkerhetsrapporter
med beskrivande exempel**

FÖRORD

Denna rapport ger en mall för framtida säkerhetsrapporter som ska redovisa den långsiktiga säkerheten inför viktiga beslut och tillstånd vid utbyggnaden av ett djupförvarssystem.

Mallen syftar till att ge en enhetlig struktur för redovisning av säkerhet på lång sikt efter det att förvaret förslutits. Tillgången till en sådan struktur kommer att förenkla både framtagning och granskning av säkerhetsrapporterna, samt göra det möjligt att följa hur analyser och säkerhetsvärderingar påverkas av det successivt mera detaljerade dataunderlag som växer fram.

Till mallen har fogats en separat del med "beskrivande exempel". Där illustreras vad mallens olika kapitel ska innehålla. För kapitel som är oberoende av djupförvarets lokalisering och utformning – t ex kapitlet om säkerhetsmål – är texten en preliminär variant av texten i kommande rapporter. System- och plats-specifika kapitel exemplifieras med material från pågående eller tidigare arbeten. Förutsättningar eller förhållanden som redovisas kan mycket väl komma att ändras under arbetet med att ta fram kommande säkerhetsrapporter.


De kapitel som i en säkerhetsrapport ska redovisa **tillämpade** metoder och kvantifierande beräkningar utnyttjas i det "beskrivande exemplet" till en genomgång av **tillgängliga** metoder och beräkningsverktyg/modeller. Metodernas och modellernas tillämpbarhet och kvalitet diskuteras och illustrerande beräkningar redovisas. Innehållet i dessa kapitel är baserat på det arbete som idag pågår, och utgör en generell lägesgenomgång.

Syftet med det "beskrivande exemplet" är att förtydliga mallens innehåll. Den samlade beskrivningen uppfyller inte de krav på fullständighet och inbördes sammanhang mellan de olika delarna som ställs på en säkerhetsrapport. En första fullständig säkerhetsrapport kommer att sammanställas inför ansökan om tillstånd för lokalisering och uppförande av en inkapslingsanläggning.

Stockholm i december 1995

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING AB

Forskning och utveckling



Tönis Papp

Forskningschef

Mall för säkerhetsrapporter

MALL FÖR SÄKERHETSRAPPORTER

Innehållsförteckning

	Sida
1	BAKGRUND OCH MÅL 1
	Bakgrund 1
	Mål 2
2	MALLENS STRUKTUR 2
	Förutsättningar och ändamål 2
	Systembeskrivning 3
	Analys av förvarssystemets utveckling 3
	Utvärdering och slutsatser 4
3	SYNOPSIS 4
	FÖRUTSÄTTNINGAR OCH SYFTE
	Kap 1 Inledning 4
	Kap 2 Säkerhetsmål och acceptanskriterier 4
	Kap 3 Metodikbeskrivning 5
	BESKRIVNING AV DJUPFÖRVARSSYSTEMET
	Kap 4 Använt kärnbränsle och övrigt långlivat avfall 5
	Kap 5 Förvarssystemets uppbyggnad 6
	Kap 6 Förvarsplatsens egenskaper 6
	Kap 7 Inplacering och utbyggnad av förvaret 7
	Kap 8 Biosfären 7
	FÖRVARSSYSTEMETS UTVECKLING MED TIDEN
	Kap 9 Analys – förvarssystemet, scenarier 8
	Kap 10 Analys – förvarets funktion 8
	Kap 11 Modeller och beräkningsmetoder för radionuklidtransport 8
	Kap 12 Scenarier/beräkningsfall 9
	UTVÄRDERING OCH SLUTSATSER
	Kap 13 Integration av resultat och osäkerhet 9
	Kap 14 Slutsatser 9

Mall för säkerhetsrapporter

1 BAKGRUND OCH MÅL

Bakgrund

I SKB FUD-program 1995 /1-5/ redovisas SKBs övergripande planering för att ta hand om Sveriges kärnavfall. Där framgår att processen att genomföra detta omfattar ett antal viktiga tillstånd och beslut som var och en kräver ett beslutsunderlag med säkerhetsbedömningar för drift och slutförvaring. För en rationell hantering av detta underlag ges här en standardiserad uppläggning – en mall – för kommande säkerhetsrapporter. Mallen omfattar enbart redovisningen av säkerhet och risker förknippade med den långa period av passiv lagring som vidtar efter det att avfallet deponerats och förvaret förslutits. Dvs inte säkerheten vid byggande och drift.

De i tiden närmaste säkerhetsrapporterna tas fram som underlag inför tillståndsansökan för inkapslingsanläggningen, SR-I, och djupförvaret, SR-D. Därefter kommer säkerhetsrapporter att sammanställas inför den inledande driften – driftsteg 1 – och den reguljära driften – driftsteg 2 – av hanteringssystem och djupförvar, samt inför den framtida förslutningen.

Säkerhetsrapporter utgör underlag för en serie beslutssteg för att genomföra djupförvaringen. De olika rapporterna måste därför ha en grundläggande kontinuitet och likformighet. Rapporterna kan dock redovisa säkerhetsbedömningar baserade på olika underlag, och besluten är ibland av olika karaktär. Detta kan innebära olikheter i hur analyserna genomförs och hur säkerhetsvärderingen redovisas. Exempelvis kommer säkerhetsrapporten för SR-I att behöva visa på den säkerhetsmässiga betydelsen av variationen i plastsegenskaper vid olika lokaliseringar i Sverige, och rapporten för SR-D behöver klarlägga ev säkerhetsskillnader mellan de två platser som karakteriserats genom platsundersökningar. Vid de följande redovisningarna behöver den säkerhetsmässiga betydelsen av successivt utökat geovetenskapligt underlag visas.

Säkerhetsredovisningar måste alltid tillgodose tre fundamentala krav:

- Syftet med det beslut som säkerhetsrapporten utgör underlag för ska vara tydligt definierat, och den genomförda utvärderingen av säkerheten ska vara relevant för detta.
- Förutsättningar, analyser och resultat (inkl osäkerheter) ska redovisas i sådan omfattning och på sådant sätt att en fristående granskning kan genomföras.
- Det ska framgå om säkerheten är tillräcklig i jämförelse med givna acceptanskriterier eller att säkerhetspotentialen är tillräcklig för att tillåta en övergång till nästa utvecklingsfas.

Mål

För att skapa en kontinuitet i säkerhetsrapporteringen och en likformighet mellan rapporterna har denna mall tagits fram för redovisning av den långsiktiga säkerheten.

Mallen ska också underlätta framtagning och granskning av säkerhetsrapporter, och förenkla jämförelser mellan hur ex vis ett utökat dataunderlaget påverkar bedömningen av säkerhetspotential och osäkerhet.

Mallen redovisas som en synopsis för kommande säkerhetsrapporter. För att därutöver tydliggöra mallens innebörd exemplifieras den föreslagna uppläggningsen med kapiteltexter. Eftersom SR 95 inte utgör en säkerhetsrapport ger denna text dock inte en redovisning av någon specifik säkerhetsanalys. Kapitlen utnyttjas istället till en beskrivning av förutsättningar och arbetsläge inför kommande säkerhetsanalyser.

Ett ytterligare syfte är således att med de beskrivande exemplen komplettera den kunskapsöversikt som ges i SKB FUD-program 95 med en detaljerad genomgång av de metoder och modellverktyg SKB har till förfogande för de närmaste säkerhetsanalyserna.

Den valda uppläggningsen diskuteras nedan varefter en genomgång av mallen görs i form av en synopsis. I den exemplifierande texten inleds de olika kapitlen med synopsis kompletterad med en kommentar om hur resp kapitel i den beskrivande exemplifieringen skiljer sig från denna synopsis.

2 MALLENS STRUKTUR

Varje säkerhetsrapport organiseras i huvudavdelningar enligt följande

- Förutsättningar och syfte
- Beskrivning av djupförvarssystemet
- Förvarssystemets utveckling med tiden
- Utvärdering och slutsatser

Indelningen i kapitel är gjord för att underlätta ”återbruk” av kapitel som inte förändras från en säkerhetsrapport till nästföljande, och för att söka samla behoven av ändringar till ett fåtal kapitel då förändringar av förutsättningar, metodik eller dimensionering genomförts.

Förutsättningar och ändamål

Denna huvudavdelning ska klargöra den utvecklingsfas som arbetet med förvarssystemet befinner sig i och det specifika beslut som säkerhetsrapporten ska vara underlag för. De övergripande säkerhetsmål och acceptanskriterier som finns för verksamheten, och eventuella etappkrav, ska redovisas.

En tillbakablick, med hänvisning till tidigare genomförda viktigare funktions- och säkerhetsanalyser ska finnas. En redovisning av säkerhetsrapportens omfattning eller specifika förutsättningar och avgränsningar ska göras tillsammans

med en beskrivning av den utnyttjade analysmetodiken, speciellt om särskilda förenklingar eller ogynnsamma förutsättningar införts.

Systembeskrivning

Systembeskrivningen omfattar kapitel för

- mängder och karakteristika för det radioaktiva avfallet,
- utformning, generell layout och dimensioner för djupförvaret,
- material och dimensioner för de tekniska barriärerna kring avfallet, samt
- platsspecifika förhållanden vad gäller förläggningens platsens geovetenskapliga karakteristika och den kringliggande biosfären.

Därutöver finns ett kapitel som redovisar den anpassning av layout etc som har gjorts för att utnyttja platsens säkerhetspotential. Detta kapitel separeras från den generella systembeskrivningen, då successiva platsanpassningar sannolikt måste genomföras under både platsundersöknings- och utbyggnadsfasen för att effektivt kunna utnyttja platsens potential till god säkerhet.

Säkerhetsredovisningen utgår från det specifika system som definieras genom systembeskrivningen. Arbete som genomförs i tidigare skeden för att, genom funktionsanalyser, känslighets- och variationsstudier samt säkerhetsanalyser, nå fram till en optimerad utformning och dimensionering av förvaret redovisas inte.

Analys av förvarssystemets utveckling

I denna huvudavdelning beskrivs i detalj den metodik som tillämpats för att analysera förvarets säkerhet, de beräkningar som gjorts och de modeller och dataunderlag som använts för detta. Huvudavdelningen uppdelas i kapitelvisa redovisningar av

- översiktlig genomgång av förvarssystemets utveckling – val av scenarier
- analys av förvarsdelarnas normala funktion
- analys av transport av radionuklider
- detaljerad kvalitativ och kvantitativ analys av valda scenarier.

De tre första kapitlen innehåller även redovisningar av metoder och verktyg som utnyttjas i analyserna. Redovisningen av de analyser som klarlägger förvarets normala funktion, att kvarhålla avfallet, separeras från redovisningen av analysen av radionuklidernas löslighet och transport vid defekta kapslar. Detta görs för att tydliggöra skillnaderna i hur den primära säkerhetsfunktionen (isoleringen) och den sekundära (svårlöslighet och fördröjning) åstadkommes. Processer som är gemensamma för båda funktionerna behandlas bara i det ena kapitlet.

Dataunderlaget för vissa säkerhetsanalyser kan vara så omfattande att det bör brytas ut till ett separat kapitel för att öka läsbarheten. Detta kapitel bör i så fall omfatta både mätdata, inklusive osäkerheter, och metoderna för att överföra dem till parametrar i säkerhetsanalysen.

Utvärdering och slutsatser

Resultaten av kvantitativa och kvalitativa bedömningar av förvarets funktion måste utvärderas med hänsyn till relevans och osäkerhet och jämföras med säkerhetsmål och acceptanskriterier. Materialet måste också bedömas med avseende på det beslut som säkerhetsredovisningen utgör underlag för. Redovisningen av detta material och de sammanfattande slutsatserna av säkerhetsbedömningarna samlas till de två sista kapitlen i rapporten.

3 SYNOPSIS

FÖRUTSÄTTNINGAR OCH SYFTE

Kap 1 Inledning

Inledningen sammanfattar förutsättningarna för arbetet med att omhänderta radioaktivt avfall i Sverige. Därefter redovisas programmet för detta arbete och hur långt man hunnit.

Sedan definieras rapportens syfte, det beslut som behöver tas, och hur den långsiktiga säkerheten påverkar detta beslut. Kapitlet avslutas med en presentation av hur rapporten är uppbyggd och vissa läsråd.

Kap 2 Säkerhetsmål och acceptanskriterier

I kapitel två redovisas de säkerhetsmål som ligger till grund för SKBs arbete med slutförvaringen av det svenska radioaktiva avfallet.

Kapitlet inleds med en sammanställning av internationella regler och bestämmelser som påverkar säkerhetsmål och acceptanskriterier. Här tas endast sådana bestämmelser med som har direkt bäring på det långsiktiga förvarings-skedet.

Därefter ges en kort översikt av de svenska lagar och förordningar som definierar de säkerhetsmässiga förutsättningarna för arbetet. Avsnittet behandlar sedan specifika bestämmelser för djupförvaringen av långlivat radioaktivt avfall i berggrunden.

I följande avsnitt diskuteras den praktiska tillämpningen av regelverket. Bl a behandlas innebörden av begreppet "helhetssyn på strålskyddsfrågorna", kollektivdos och dos till andra organismer än människor. Här diskuteras också hur säkerhetsmål och acceptanskriterier på ett ändamålsenligt sätt ska kunna överföras till olika mätetal för förvarets funktion. Mätetalen ska utgöra nyckeltal eller funktionsindex som på ett praktiskt sätt kan tillämpas i olika faser av förvarets funktion eller under olika skeden av arbetet med att realisera förvaret. De ska vara relevanta för viktiga säkerhetsfunktioner och enkla att relatera till formella säkerhetskrav.

Säkerhetsrelaterade faktorer som utnyttjas i lokaliseringen måste väljas så att de kan granskas i de undersökningar som planeras under lokaliseringsprocessen. Prioriteringar och balans vad avser säkerheten under förväntade normala förhållanden och under mindre normala förhållanden diskuteras.

Kapitlet avslutas med en kort sammanfattning av normsystem och praxis för miljöfarliga ämnen som inte är radioaktiva.

Kap 3 Metodikbeskrivning

I kapitel 3 redovisas SKBs metodik för aktuell säkerhetsutvärdering.

Den historiska bakgrunden av tidigare designstudier och till dessa knutna funktions- och säkerhetsanalyser redovisas i ett inledande avsnitt och en orienterande bild ges av hur arbetet lett fram till systemets generella utformning. Det ska dock tydligt framgå att den säkerhetsanalys som redovisas granskar säkerheten för det valda och presenterade systemet. Möjligheter till alternativa utformningar presenteras i den mån det finns behov att redovisa kvarstående frihetsgrader eller anpassningsmöjligheter till platsspecifika förhållanden.

Därefter diskuteras det säkerhetsmässiga underlag som krävs för de aktuella besluten, och den inriktning och de avgränsningar för säkerhetsrapporten detta leder till. Avgränsningarnas effekt på säkerhetsanalyserna diskuteras, varefter analysgången i funktions- och säkerhetsanalyserna presenteras. I avsnittet ges också en överblick av hur säkerheten i det passiva förvaringsskedet anknyter till hanteringen av avfallet och till uppbyggnaden och kontrollen av förvar och säkerhetsbarriärer. Avsnittet avslutas med en rekapitulation av radiologiska säkerhetsmål och acceptanskrav enligt kapitel 2 och en redovisning av de specifika mätetal som utnyttjas i den aktuella säkerhetsredovisningen.

Därpå följande avsnitt redovisar de metoder som utnyttjats för att systematiskt granska de förhållanden i djupförvaret som är viktiga för funktion och säkerhet, samt de händelser och processer som kan påverka förvarets utveckling med tiden. Begrepp som processsystem, normalscenario, referensscenariot etc definieras. Möjligheter till att täcka in rimliga utvecklingsvägar för förvaret med olika scenarier/beräkningsfall diskuteras. Likaså diskuteras på ett övergripande plan, möjligheterna att kvantifiera de olika scenarierna samt hur denna kvantifiering beror av informationstillgång och aktuellt arbetsskede.

I följande avsnitt görs en genomgång av de osäkerheter som kommer in vid genomförandet av säkerhetsanalysen. Möjligheterna för att kvantifiera eller avgränsa dessa diskuteras liksom också möjligheterna att integrera dem i en total osäkerhetsuppskattning.

I ett avslutande avsnitt ges en beskrivning av de kvalitetsrutiner som tillämpats vid genomförandet av respektive säkerhetsanalys.

BESKRIVNING AV DJUPFÖRVARSSYSTEMET

Kap 4 Använt kärnbränsle och övrigt långlivat avfall

I kapitel 4 ges en beskrivning av det använda kärnbränsle och övrigt avfall som ska deponeras i djupförvaret. Kapitlet delas upp i tre avsnitt omfattande använt kärnbränsle, annat långlivat radioaktivt avfall resp övrigt toxiskt avfall. Beskrivningen avser de olika avfallstypernas fysiska och kemiska form, samt mängder och innehåll av viktigare radionuklider.

Avsnittet om använt bränsle innehåller också en diskussion om bränslets struktur: sprickor i bränslekutsar, bränslefragmentens storleksfördelning, yta och porositet samt egenskaper hos gapet mellan bränsle och kapslingsrör. Dessutom beskrivs fördelning av fissions- och aktiveringsprodukter inne i bränslet och i de konstruktionselement som tas in i kapseln.

Modeller för och beräkningar av nuklidinventarier och resteffekter både för det använda bränslet och övrigt långlivat avfall redovisas, samt de urvalskriterier som använts för att bestämma vilka radionuklider som ska inkluderas i analysen.

Kap 5 Förvarssystemets uppbyggnad

Kapitel 5 redovisar förvarssystemets och de tekniska barriärernas utformning. Materialet baseras på det underlag som i aktuellt projekteringskede ligger till grund för den säkerhetsanalys som redovisas. Kapitlet presenterar djupförvarets utformning och material, kvalitetskrav/föroreningar och dimensioner för de barriärer som ingår i förvarssystemet. Likaså redovisas metoder för byggande och kontroll som kan komma att utnyttjas och de eventuella effekter dessa kan ha på kringliggande berg. Funktionsstudier eller tidigare säkerhetsanalyser som legat till grund för val av dimensionering eller utformning refereras. ”Fria” paramerar som kan utnyttjas för platsanpassning eller optimering redovisas separat.

Mot bakgrund av de viktigare säkerhetsfunktionerna för olika barriärer görs en genomgång av principerna för förvarets uppbyggnad varefter underjordsanläggningens olika delar och deras utformning/layout presenteras. Sedan presenteras utförandet av deponeringspositioner och utförande/utformning av kapsel, bentonitbuffert och tunnelåterfyllning. Pluggning av tunnlar och schakt samt förvarets slutliga försegling diskuteras.

Kap 6 Förvarsplatsens egenskaper

I kapitlet redovisas de geovetenskapliga egenskaper hos den valda förvarsplatsen som är av betydelse för den långsiktiga säkerheten hos ett djupförvar i kristallint berg.

Utifrån platsdata och geovetenskaplig förståelse skapas en platsmodell som utgör en redovisning av platsens strukturella egenskaper med avseende på långsiktig säkerhet. Denna kan sägas utgöra en sammanvägning av insamlad geologisk, geofysisk, geokemisk och geohydrologisk information.

Kapitlet organiseras i avsnitt som beskriver geologi, grundvattnets kemi, geohydrologi, och bergets transportegenskaper.

Den sammanvägda platsmodellen är behäftad med osäkerheter som diskuteras i varje ämnesavsnitt och sammanfattas i ett avslutande avsnitt. Konsekvenserna av dessa osäkerheter i platsbeskrivningen vad gäller resultaten av säkerhetsanalysen redovisas dock senare i rapporten. Redovisningen av platsens egenskaper görs utifrån dagens förhållanden. Tidsberoende förändringar diskuteras i respektive ämnesavsnitt.

Kap 7 Inplacering och utbyggnad av förvaret

Förvarsutformningen i kapitel 5 är generell till sin natur, dvs oberoende av någon detaljerad kunskap om platsens specifika egenskaper. I praktiken behöver utformningen av ett förvar alltid anpassas till den specifika platsen. Detta kapitel beskriver vilka platsanpassningar som genomförs på den förläggingsplats som är aktuell för redovisningen. Anpassningarna kan gälla hur de olika förvarsdelarna förläggs i förhållande till varandra, hur tunnlar/schakt och deponeringsområden placeras, eller hur djupt ner i berget olika anläggningsdelar placeras. Anpassningar kan också behöva genomföras med hänsyn till sprick- eller svaghetszoner, bergkvalitet, grundvattnets strömningsvägar eller biosfärens recipienter för djupt grundvatten.

Kapitlet diskuterar också möjligheter till anpassning under utbyggnadens gång, alternativutformning och den kvarstående frihet vad gäller utformning som finns för framtida optimering.

Kap 8 Biosfären

I kapitlet redovisas den valda förvarsplatsens biosfär med fokus på faktorer av betydelse för spridning av radionuklider.

Baserat på data från den geovetenskapliga och hydrologiska karakteriseringen av platsen beskrivs grundvattenrecipienter och spridningsvägar i förvarets omgivning. Likaså diskuteras plats- och regionspecifikt utnyttjande av naturen och överföringsvägar till människan. Eventuella platsspecifika spridningsmodeller redovisas.

En specifik karakterisering av biosfären kan behöva göras som underlag till analyserna av eventuella radiologiska konsekvenser för andra organismer än människan.

Osäkerheterna diskuteras, främst mot bakgrund av ekosystemens höga potential till förändring med tiden, och med hänsyn till de platsspecifika faktorer som kan begränsa föränderligheten.

FÖRVARSSYSTEMETS UTVECKLING MED TIDEN

Kap 9 Analys – förvarssystemet, scenarier

Kapitlet inleds med en översikt av förvaret och dess funktion. Därefter följer en genomgång av förvarets barriärer, de tidsberoende processer som kan förekomma i förvaret, eller mellan förvaret och dess omgivning, och den därav föranledda utveckling över tiden.

Den i säkerhetsanalysen tillämpade scenariemetodiken redovisas. Resultande interaktionsmatriser och dokumentationsuppläggning presenteras och diskuteras

Valet av scenarier och hur scenarierna behandlas i säkerhetsanalysen går igenom. Slutligen diskuteras osäkerheter och fullständighet i scenariearbetet.

Kap 10 Analys – förvarets funktion

Analysen av förvarssystemets funktion uppdelas på två kapitel. Kapitel 10 redovisar de processer och förhållanden som styr (eller kan förändra) barriärernas primära säkerhetsfunktion – att isolera det använda kärnbränslet från grundvattnet. Kapitel 11 redovisar de processer och förhållanden som kontrollerar förvarets sekundära säkerhetsfunktion – att begränsa upplösningen av radionuklider i en skadad kapsel, och att fördröja deras transport till biosfären.

Detta kapitel redovisar de olika förvarsdelarnas förväntade funktion för att bibehålla isoleringen, och processer som kan påverka denna funktion. Kapitlet delas upp i avsnitten

- termisk utveckling
- bergets funktion
- kapselfunktion
- buffertfunktion
- upplösningssprocesser i kapseln

I avsnitten redovisas funktionskrav, väsentliga processer, metoder att analysera och kvantifiera processerna, samt parameterbegränsningar införda för att tillförsäkra sig önskad funktion eller för att förenkla analyserna.

Vissa processer och förhållanden är väsentliga för både isolerings- och fördröjningsfunktionen. Ett exempel är grundvattnets rörelse och dess förmåga att transportera lösta ämnen eller kolloider. Sådana processer hanteras bara i det ena kapitlet och hänvisningar görs mellan kapitlen.

Kap 11 Modeller och beräkningsmetoder för radionuklidtransport

I detta kapitel redovisas förvarsdelarnas funktion vad gäller upplösning och transport av radionuklider från en skadad kapsel och de processer och förhållanden som kan påverka denna funktion.

Kapitlet delas upp i avsnitten

- grundvattenrörelser
- transport i närområdet
- transport i omgivande berggrund
- spridning av radionuklider i biosfären och dosberäkning.

I varje avsnitt redovisas väsentliga processer och de parametrar och beräkningsmodeller som använts för att analysera processerna. Modellernas kvalitet och tillämpbarhet kommenteras.

Kapitlet avslutas med en redovisning av den strategi som tillämpas för beräkningskedjan (från radionuklidernas frigörelse till dos i omgivningen) som kvantifierar konsekvenserna vid defekta kapslar. Strategin väljs utifrån de syften som säkerhetsredovisningen har. Här berörs övergripande spörsmål såsom uppbyggnaden av beräkningskedjan, modellkopplingar, graden av probabilism i analysen, hantering av långa tider etc. Även vissa strategiska val för enskilda modeller redovisas här, t ex val av bränsleupplösningssmodell, den uppsättning nuklider som tagits med i beräkningarna, konceptualisering av när- och fjärrområde, beskrivningen av förvarssystemets utbredning i berget, hur platspeci-

fikt enskilda modeller utformats m m. Avsnittet kan även placeras först i kapitel 12.

Kap 12 Scenarier/beräkningsfall

I detta kapitel re visas resultaten av analysen av valda scenarier eller beräkningsfall. I separata avsnitt redovisas kvalitativa beskrivningar eller beräkningsresultat från huvudfall, variationer och känslighetsanalyser av

- normalscenario
- typdefektsscenario
- glaciation
- jordbävningar
- effekter av mänsklig verksamhet
- kvarlämnade material i djupförvaret
- övriga scenarier.

UTVÄRDERING OCH SLUTSATSER

Kap 13 Integration av resultat och osäkerhet

Kapitlet ska redovisa den utvärdering och den sammanvägning som, i form av en samlad säkerhetsbild, görs av de bedömningar och beräkningar som framkommit genom säkerhetsanalyserna. Utvärderingen/sammanvägningen ska dels relateras till det aktuella syftet, dels redovisa den grad av robusthet som säkerhetsvärderingarna har med avseende på underlagets osäkerhet.

Kap 14 Slutsatser

Kapitlet sammanfattar den samlade säkerhetsbedömning som genomförts.

Beskrivande exempel

BESKRIVANDE EXEMPEL

Innehållsförteckning

	Sida	
1	INLEDNING	1
1.1	BAKGRUND	1
1.2	PLANERING	1
1.3	RAPPORTENS SYFTE	3
1.4	RAPPORTENS UPPLÄGGNING	3
2	SÄKERHETSMÅL OCH ACCEPTANSKRITERIER	5
2.1	INLEDNING	6
2.2	INTERNATIONELLA REGLER OCH REKOMMENDATIONER	6
2.2.1	Inledning	6
2.2.2	IAEA – FNs Internationella Atomenergiorgan	7
2.2.3	Europeiska unionen	7
2.2.4	ICRP, International Commission on Radiological Protection	7
2.2.5	Nordiskt samarbete	8
2.3	SVENSKA OCH NORDISKA MYNDIGHETERS KRITERIER FÖR DJUPFÖRVARING AV LÅNGLIVAT AVFALL	8
2.3.1	Inledning	8
2.3.2	Övergripande mål	9
2.3.3	Strålskyddskrav	9
2.3.4	Krav och rekommendationer för förvarsutformning och säkerhetsredovisning	12
2.4	PRAKTISKA TILLÄMPNINGAR	12
2.5	HELHETSSYN PÅ STRÅLSKYDDSFRÅGORNA	13
2.5.1	Inledning	13
2.5.2	Radiologiska risker i kärnbränslecykeln	14
2.5.3	Tillämpning av helhetssyn på strålskyddsfrågor	17
2.6	KEMISKA RISKER	18
3	METODIKBESKRIVNING	19
3.1	ALLMÄNT OM FUNKTIONS- OCH SÄKERHETSANALYSER	20
3.2	OMFATTNING OCH AVGRÄNSNINGAR FÖR ANALYSEN	23
3.3	SCENARIEMETODIK	25
3.3.1	Inledning	25
3.3.2	Viktiga begrepp	26
3.3.3	RES-metodiken	27
3.3.4	Idag tillämpad scenariemetodik	30
3.4	OSÄKERHET OCH VALIDITET	31
3.4.1	Inledning	31
3.4.2	Osäkerheter i analysens förutsättningar	32

3.4.3	Kvalitativ beskrivning, scenarier	33
3.4.4	Modelleringar	34
3.4.5	Beräkningar, indata	34
3.4.6	Sammanvägning	35
4	ANVÄNT KÄRNBRÄNSLE OCH ÖVRIGT LÅNGLIVAT AVFALL	37
4.1	INLEDNING	37
4.2	ANVÄNT KÄRNBRÄNSLE	37
4.2.1	Mängder och utbränningsgrader	38
4.2.2	Bränslets fysikaliska och kemiska struktur	39
4.2.3	Definition av typbränsle	40
4.2.4	Radionuklidinventarium och resteffekt	41
4.2.5	Urval av nuklider för säkerhetsanalysen	42
4.3	ANNAT LÅNGLIVAT AVFALL	45
4.4	ÖVRIGT TOXISKT AVFALL	46
5	FÖRSVARSSYSTEMETS UPPBYGGNAD	47
5.1	INLEDNING	47
5.2	FÖRSVARSSYSTEMETS UTFORMNING OCH LAYOUT	48
5.2.1	Del för använt kärnbränsle	49
5.2.2	Del för annat långlivat avfall	53
5.3	KAPSEL	55
5.3.1	Inledning	55
5.3.2	Utformning	56
5.3.3	Kvalitetskontroll	58
5.3.4	Alternativa utformningar	58
5.4	BUFFERT OCH ÅTERFYLLNING	58
5.4.1	Funktionskrav	58
5.4.2	Materialval	60
5.4.3	Teknik för applicering	60
6	FÖRVARSPLOTSENS EGENSKAPER	63
6.1	ALLMÄNT OM PLATSEN	63
6.1.1	Inledning	63
6.1.2	Äspö	63
6.1.3	Översiktligt om genomförda undersökningar och tillgängliga data	64
6.2	GEOLOGI	66
6.2.1	Inledning	66
6.2.2	Läge och topografi	66
6.2.3	Utförda geologiska undersökningar	66
6.2.4	Berggrundens sammansättning	67
6.2.5	Geologisk utveckling och strukturgeologiskt mönster	69
6.2.6	Geologisk modell av Äspöområdet	70
6.2.7	Bergmekanik	70
6.2.8	Modellens osäkerhet och tidsberoende förändringar	73
6.3	GRUNDTVATTNETS KEMI	74
6.3.1	Inledning	74
6.3.2	Utförda geokemiska undersökningar på Äspö	74

6.3.3	Grundvattenkemisk modell av Äspö	74
6.3.4	Redoxförhållanden	75
6.3.5	Referensvatten för Äspö	76
6.3.6	Osäkerhet och variationer i tiden	77
6.4	GEOHYDROLOGI	78
6.4.1	Inledning	78
6.4.2	Utförda geohydrologiska undersökningar	78
6.4.3	Grundvattenyta och hydrometeorologi	78
6.4.4	Berggrundens hydrauliska egenskaper	79
6.4.5	Avgränsningar i grundvattenflödessystemet och utströmningsområden	79
6.4.6	Geohydrologisk modell av Äspö	81
6.4.7	Osäkerhet och tidsberoende förändringar	81
6.5	TRANSPORTEGENSKAPER I BERGET	82
6.5.1	Inledning	82
6.5.2	Sorption och matrisdiffusion	83
6.5.3	Kolloider	84
6.5.4	Bakterier	84
6.5.5	Osäkerhet och tidsberoende förändringar	85
6.6	OSÄKERHETER I PLATSMODELLEN	85
6.6.1	Inledning	85
6.6.2	Platsegenskapernas allmängiltighet	85
6.6.3	Sammanvägd platsmodell	86
6.6.4	Osäkerhet i platsbeskrivningen	87
6.6.5	Osäkerhetens potentiella betydelse för den långsiktiga säkerheten	87
7	INPLACERING OCH UTBYGGNAD AV FÖRVARET	89
7.1	PLATSENS INVERKAN PÅ FÖRVARETS LAYOUT	89
7.1.1	Allmänt	89
7.1.2	Inbördes placering av förvarsdelar	89
7.1.3	Form och storlek på bergutrymmen	90
7.1.4	Erfarenheter från inplacering av tunnlar och bergrum i Äspölaboratoriet	90
7.2	PLATSSPECIFIKA TERMISKA EGENSKAPER	90
7.2.1	Allmänt	90
7.2.2	Bergets termiska egenskaper	93
7.2.3	Bentonitbuffertens termiska egenskaper	93
7.2.4	Erfarenheter från arbetet i Äspölaboratoriet	93
7.3	EFFEKTER PÅ NÄRBERGETS EGENSKAPER	94
7.3.1	Allmänt	94
7.3.2	Påverkan vid fullprofilborrning av deponeringshål	94
7.3.3	Påverkan vid sprängning av tunnlar	95
7.3.4	Påverkan av uppvärmning	95
7.4	BYGGNADSMATERIAL	95
7.4.1	Åtgång av byggnadsmaterial	95
7.4.2	Annat material som kan bli kvar i djupförvaret	95
8	BIOSFÄREN	97
8.1	INLEDNING	97

8.2	BIOSFÄRENS RECIPIENTER	98
8.3	MÄNNISKANS UTNYTTJANDE AV NATUREN	100
8.4	SKYDDSVÄRDA ARTER OCH MILJÖER	100
8.5	TIDSBEROENDE FÖRÄNDRINGAR	100
9	ANALYS – FÖRVARSSYSTEMET, SCENARIER	101
9.1	FÖRVARETS AVSEDDA FUNKTION	101
9.1.1	Närzonens barriärer, deras funktion och utveckling	103
9.1.2	Fjärrzonen, dess funktion och utveckling	105
9.1.3	Biosfären och dess utveckling	106
9.2	SCENARIEMETODIK	106
9.3	INTERAKTIONSMATRISER	107
9.3.1	Närzonsmatriserna	110
9.3.2	Fjärrzonsmatrisen	115
9.3.3	Biosfärsmatrisen	115
9.4	INITIERANDE HÄNDELSER OCH SCENARIER	117
9.4.1	Val av scenarier	118
9.4.2	Analyserade scenarier	121
9.5	OSÄKERHET OCH FULLSTÄNDIGHET	121
10	ANALYS – FÖRVARETS FUNKTION	123
10.1	INLEDNING	123
10.2	TERMISK UTVECKLING	124
10.2.1	Inledning	124
10.2.2	Allmänt om värmetransport i djupförvaret	124
10.2.3	Modellering av värmetransport	125
10.2.4	Tillgängliga beräkningsverktyg	126
10.2.5	Resultat från temperaturberäkningar	126
10.3	BERGETS FUNKTION	127
10.3.1	Inledning	127
10.3.2	Bergets funktion i ett djupförvar	127
10.3.3	Effekter av djupförvaret i berget	129
10.3.4	Förändringar med tiden	131
10.4	KAPSELFUNKTION	133
10.4.1	Kapselns mekaniska egenskaper	133
10.4.2	Effekter av strålning inuti och utanför kapseln	133
10.4.3	Kopparkorrosion under olika förhållanden	133
10.4.4	Järn- eller stålkorrosion under olika förhållanden	135
10.4.5	Naturliga analogier	136
10.5	BUFFERTFUNKTION	136
10.5.1	Inledning	136
10.5.2	Den omättade perioden	136
10.5.3	Processer som påverkar buffertens funktion efter vattenmättnad	137
10.5.4	Buffertens påverkan på förvarets kemiska förhållanden	141
10.5.5	Buffertmaterialalets masstransportegenskaper	143
10.6	UPPLÖSNINGSPROCESSER I KAPSELN	144
10.6.1	Inledning	144
10.6.2	Vattenkemisk miljö	144
10.6.3	Upplösning av bränsle	146

10.6.4	Frigörelse av nuklider från metalldelar	149
10.7	RADIONUKLIDERNAS LÖSLIGHET	150
10.7.1	Inledning	150
10.7.2	Fissions- och aktiveringsprodukter	150
10.7.3	Tunga nuklider	153
10.7.4	Beräkningar av radionuklidlöslighet	155
11	MODELLER OCH BERÄKNINGSMETODER FÖR RADIONUKLIDTRANSPORT	157
11.1	ALLMÄNT OM MODELLERING	157
11.2	GRUNDVATTENRÖRELSER	159
11.2.1	Inledning	159
11.2.2	Allmänt om grundvattenrörelser	159
11.2.3	Modellering av grundvattenrörelser	160
11.2.4	Tillgängliga beräkningsverktyg	163
11.3	NUKLIDTRANSPORT, NÄRZON	165
11.3.1	Inledning	165
11.3.2	Transport av nuklider i närområdet	165
11.3.3	Beräkningsverktyg för nuklidtransport i närzon	167
11.3.4	Radionuklidtransport med gas	170
11.4	NUKLIDTRANSPORT, FJÄRRZON	171
11.4.1	Inledning	171
11.4.2	Transport av nuklider i berget	171
11.4.3	Modellering av nuklidtransport	173
11.4.4	Tillgängliga beräkningsverktyg	175
11.5	RADIOEKOLOGI OCH DOSBERÄKNING	176
11.5.1	Inledning	176
11.5.2	Tidsperspektiv	176
11.5.3	Beräkningsmodeller	177
11.5.4	Beräkningsstrategi	178
11.5.5	Dosberäkning	179
11.6	STRATEGI FÖR MODELLERING AV RADIO- NUKLIDTRANSPORT	180
11.6.1	Inledning	180
11.6.2	Modulariserad beräkningskedja	180
11.6.3	Modellkedjan, processer i och utanför kedjan	181
11.6.4	Graden av probabilism i analysen	181
11.6.5	Val av geohydrologisk beräkningsmodell	182
11.6.6	Distribuerad förvarsmodell	182
11.6.7	Konceptualisering av närzonen	182
11.6.8	Val av bränslemodell	183
11.6.9	Val av nuklider	184
11.6.10	Konceptualisering av fjärrområdet	184
11.6.11	Platsspecifik biosfär	185
11.6.12	Hantering av tidsberoende förändringar i geosfär och biosfär	185
12	SCENARIER/BERÄKNINGSFALL	187
12.1	INLEDNING	187
12.2	NORMALSCENARIET	187
12.2.1	Inledning	187
12.2.2	Förutsättningar	187

12.2.3	Systemets förväntade utveckling	189
12.2.4	Konsekvenser av normalscenariet	191
12.3	TYPDEFEKTSCENARIET	191
12.3.1	Förutsättningar för beräkningen	192
12.3.2	Resultat	197
12.3.3	Översiktliga variationsdiskussioner	207
12.3.4	Radionuklidtransport i gasfas	209
12.4	MÄNSKLIGT ORSAKADE SCENARIER	210
12.4.1	Inledning	210
12.4.2	Diskussionspunkter – påverkan, kunskap, vilja och uppsåt	211
12.4.3	Exempel – genomborrning av kapsel	213
12.5	ISTIDSSCENARIER	221
12.5.1	Bakgrund	221
12.5.2	Klimatförändringar, glaciationer och effekterna av dem	221
12.5.3	Modellering av glaciationer och dess effekter	224
12.5.4	Istidsscenarioer	226
13	INTEGRATION AV RESULTAT OCH OSÄKERHET	229
14	SLUTSATSER	229
	REFERENSER	231
	BILAGA 1–5	

1 INLEDNING

Inledningen sammanfattar förutsättningarna för arbetet med att omhänderta radioaktivt avfall i Sverige. Därefter redovisas programmet för detta arbete och hur långt man hunnit.

Sedan definieras rapportens syfte, det beslut som behöver tas, och hur den långsiktiga säkerheten påverkar detta beslut. Kapitlet avslutas med en presentation av hur rapporten är uppbyggd och vissa läsråd.

I denna rapport utgör avsnitt 1.3 en beskrivning av syftet med SR 95.

1.1 BAKGRUND

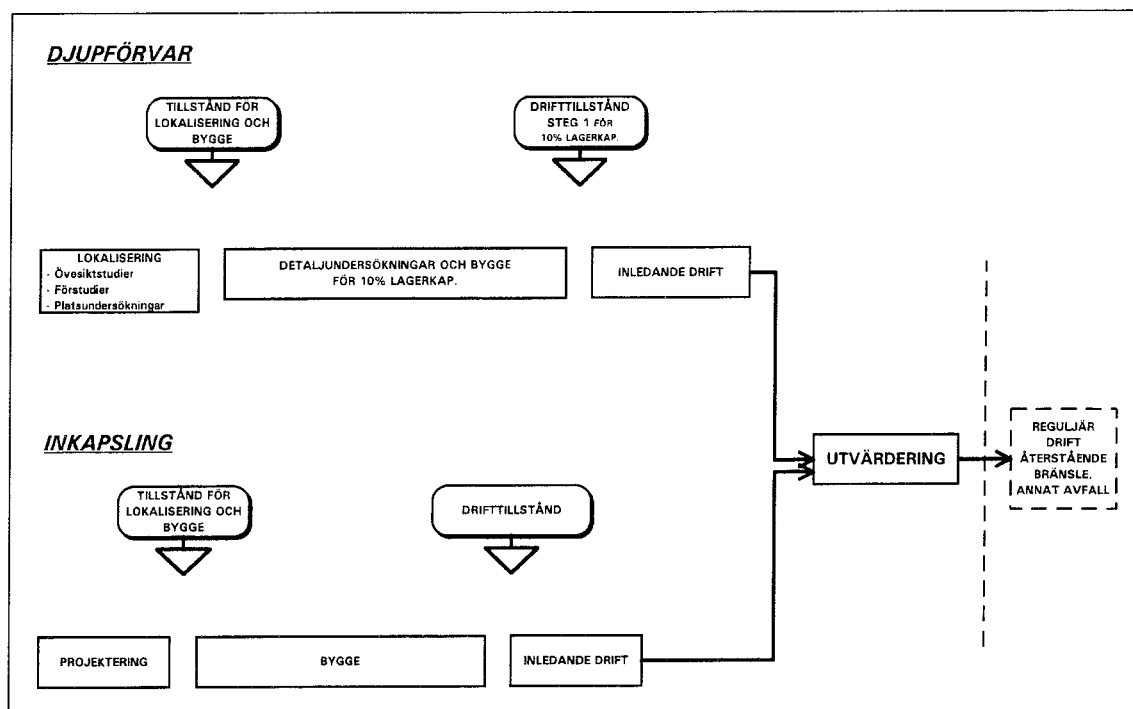
SKB ska, på uppdrag av de svenska kärnkraftägarna, bl a ta fram förslag till hur och var det radioaktiva avfallet slutgiltigt ska tas om hand. Väsentliga delar av avfallssystemet är redan i drift. De delar som ännu inte finns är anläggningar dels för inkapsling av använt bränsle m m, dels för slutförvaring av långlivat avfall, särskilt använt kärnbränsle.

Det existerande systemet har utvecklats och byggts upp på basis av förslag som bl a lades fram av Aka utredningen i mitten av 1970-talet samt den forskning och det utvecklingsarbete som inleddes med KBS-projektet under andra halvan av 1970-talet. Förslag och alternativa möjligheter har därefter prövats och utretts av såväl myndigheter som kraftindustrin i omfattande FoU-arbeten under hela 1980-talet. Härigenom har viktigare frågor för inkapsling och slutförvaring fått en ingående belysning. Liknande arbeten har genomförts och genomförs i flertalet länder med betydande kärnkraftutbyggnad.

Det arbete som utförts under ca 15 år i Sverige och utomlands har lett till en bred enighet bland internationell expertis att det finns metoder för att genomföra en slutförvaring av högaktivt avfall och använt kärnbränsle, samt att det också finns metoder för att granska den långsiktiga säkerheten i en sådan slutförvaring. I FUD-program 1992 med kompletteringar /1-1, 2/, redovisades en prioriterad systemutformning samt en plan för att utse kandidatplatser för förvarets lokalisering, för att karakterisera dem och för att anpassa förvaret till lokala förhållanden. Regeringen har, efter omfattande expert- och myndighetsgranskning av programmet /1-3, 4/, i allt väsentligt accepterat den föreslagna inriktningen.

1.2 PLANERING

Utbyggnaden av en inkapslingsanläggning och ett djupförvar innefattar ett stort antal åtgärder som beslutas etappvis. Figur 1.2-1 ger ett översiktligt logikschema över djupförvarsprogrammet. Åtgärder som berör djupförvaret om-



Figur 1.2-1. Schema över viktigare steg i djupförvarsprogrammet och erforderliga tillstånd.

sluter en tidrymd av ca 60 år eller längre från start av förstudier fram till genomförd förslutning av förvaret.

Analysen av den långsiktiga säkerheten genomförs, och redovisas i form av säkerhetsrapporter, inför viktigare beslutstillfällen i programmet. Sådana beslutstillfällen (t ex vid viktiga vägval eller inför åtgärder som innebär väsentliga bindningar till viss plats) har genom lagstiftningen också kopplats till myndighetsgranskning och tillståndsgivning. Från starten av förvarsutformning och lokalisering fram till ett tillstånd att slutgiltigt försegla ett fyllt djupförvar kommer ett flertal säkerhetsrapporter att produceras.

De två beslutstillfällen som ligger närmast i programmet är tillstånd för en inkapslingsanläggning för använt kärnbränsle, och tillstånd inför starten av detaljerade geovetenskapliga platsundersökningar för ett djupförvar.

Olika säkerhetsbedömningar i programmet baseras på olika dataunderlag, och skiljer sig därför från varandra. Då säkerhetsrapportens syfte är att belysa grunden för en successivt ökad bindning till systemutformning och plats för djupförvaret, är det dock väsentligt att även i tidiga rapporter granska och redovisa potentialen till förvarets totala säkerhet. För att underlätta uppföljning av hur säkerhetsbedömningen av en plats påverkas av utökad informationen har SKB funnit det ändamålsenligt att etablera en mall för kommande säkerhetsrapporters utformning. Denna rapport, SR 95, ger ett förslag till en sådan mall för framtida säkerhetsrapporter för djupförvaret, och föreliggande del, som utgör ett beskrivande exempel, har strukturerats efter denna mall.

1.3 RAPPORTENS SYFTE

Målet

Det primära målet med SR 95 är att etablera en mall för uppläggning och innehåll av framtida säkerhetsrapporter. Mallen har syftet att

- förenkla framtagning av framtida säkerhetsrapporter,
- underlätta en uppföljning av hur säkerhetsanalyser och bedömningar successivt kompletteras och detaljeras i olika arbetsskeden,
- förenkla granskningen av säkerhetsrapporterna.

För att förtydliga mallens innebörd har också en beskrivande exemplifiering gjorts enligt föreslagen kapitelindelning. Varje kapitel har där fått en text som antingen visar vad redovisningen avses omfatta, eller diskuterar alternativ till detta.

Eftersom SR 95 publiceras i anslutning till FUD-program 95 /1-5/ är ett sekundärt mål att genom den exemplifierande texten också ge en detaljering av

- hur framtida säkerhetsanalyser kommer att genomföras inom SKB,
- de metoder som utvecklats för att skapa systematik och spårbarhet i arbetet, samt av
- de beräkningsmodeller som SKB idag har till sitt förfogande för att kvantifiera förvarets funktion och säkerhet.

1.4 RAPPORTENS UPPLÄGGNING

Det beskrivande exemplet omfattar enligt föreslagen mall fyra huvuddelar:

- säkerhetsrapportens förutsättningar och syfte,
- beskrivning av djupförvarssystemet,
- förvarssystemets utveckling med tiden,
- utvärdering och slutsatser.

Varje kapitel inleds med ett stycke i kursiv stil där intentionerna för avsnittet och dess innehåll presenteras. Här kommenteras också det specifika innehåll i SR 95 som skiljer sig från mallen, t ex vid de generella genomgångarna av kunskaps- och utvecklingsläget för säkerhetsanalysmetoder. Därefter följer, i normal stil, en illustrativ redovisning av hur avsnittet kan se ut vid ett ansökningstillfälle.

Förberedelser pågår för en ansökan om tillstånd att lokalisera och bygga en inkapslingsanläggning. Därför kommer den illustrerande texten i SR 95 i stor utsträckning att baseras på material som håller på att tas fram till säkerhetsrapporten för inkapslingsanläggningen, SR-I, eller för den därpå följande säkerhetsrapporten – tillstånd för Djupförvaret inför detaljerade geovetenskapliga undersökningar av en potentiell lokaliseringsplats, SR-D. Materialet är i dagsläget delvis ofullständigt och förutsättningar som redovisas kan komma att ändras.

Avsnitt som är oberoende av specifika platsdata och detaljutformning har en detaljering nära den som planeras för kommande säkerhetsrapporter för tillståndsansökningar. Avsnitt med stark koppling till platsundersökningar eller projekteringen av barriärer har i SR 95 utnyttjats till att belysa väsentliga frågeställningar och diskutera arbetsmetodik och angreppssätt för säkerhetsbedömningar. Detta görs med belysande material från tidigare rapporter, med nyligen publicerat material för koppar/stål kapseln eller med material från Äspö.

I kommande säkerhetsrapporter kommer kapitel 3 – Metodikbeskrivning och kapitlen 9-11 (Analys – förvarssystemet, scenarier; Analys – förvarets funktion; resp. Modeller och beräkningsmetoder för radionuklidtransport) att redovisa de metoder och modeller för analys och kvantifiering som faktiskt utnyttjats. I föreliggande dokument används dessa kapitel till en generell redovisning av tillgängliga metoder i säkerhetsanalysen, och deras användbarhet.

I många fall förekommer hänvisningar till arbetsrapporter. Dessa redovisar ofta arbete som pågår inför SR-I. Bedömningar och värderingar i dessa kan komma att revideras under arbetets gång.

2 SÄKERHETSMÅL OCH ACCEPTANSKRITERIER

I kapitel två redovisas de säkerhetsmål som ligger till grund för SKBs arbete med slutförvaringen av det svenska radioaktiva avfallet.

Kapitlet inleds med en sammanställning av internationella regler och bestämmelser som påverkar säkerhetsmål och acceptanskriterier. Endast sådana bestämmelser som har direkt bäring på det långsiktiga förvarsskedet har tagits med. Därefter ges en kort översikt av de svenska lagar och förordningar som definierar de säkerhetsmässiga förutsättningarna för arbetet. Avsnittet fokuseras därefter på de specifika bestämmelserna för djupförvaringen av långlivat radioaktivt avfall i berggrunden.

I följande avsnitt diskuteras den praktiska tillämpningen av regelverket. Bl a behandlas innebörden av begreppet "helhetssyn på strålskyddsfrågorna", kollektivdos och dos till andra organismer än människor. Här diskuteras också hur säkerhetsmål och acceptanskriterier, på ett ändamålsenligt sätt ska kunna överföras till olika måttetal för förvarets funktion. Mätetalen ska utgöra nyckeltal eller funktionsindex som på ett praktiskt sätt kan tillämpas i olika faser av förvarets funktion eller under olika skeden av arbetet med att realisera förvaret. De ska vara relevanta för viktiga säkerhetsfunktioner och enkla att relatera till formella säkerhetskrav.

Säkerhetsrelaterade faktorer som utnyttjas i lokaliseringen måste väljas så att de kan granskas i de undersökningar som planeras under lokaliseringsprocessen. Prioriteringar och balans vad avser säkerheten under förväntade normala förhållanden och under mindre normala förhållanden diskuteras.

Kapitlet avslutas med en kort sammanfattning av normsystem och praxis för toxiska eller miljöfarliga ämnen som inte är radioaktiva.

I denna rapport baseras genomgången av svenska bestämmelser för djupförvaret på två vägledande dokument, dels de grundkriterier som de nordiska strålskydds- och kärnsäkerhetsmyndigheterna formulerade 1993, dels de överväganden som redovisats i SSI-rapport 95-02. Avsnittet kommer att revideras när formella föreskrifter upprättas.

Avsnittet om helhetssyn på strålskyddsfrågorna utgör en genomgång av helheten med avseende dels på de olika anläggningar som finns i kärnbränslecykeln, dels på de olika tidsaspekter som är knutna till eventuella konsekvenser. En praktisk tillämpning av begreppet "helhetssyn" förutsätter en fortsatt dialog med myndigheterna om vilka måttetal och metoder som är lämpliga för att granska och etablera balans

- mellan olika anläggningsdelar;
- mellan normaldrift och risk för missöden samt
- mellan exponeringsrisker under olika tidskedan.

Även detta avsnitt behöver bearbetas för att vara en god vägledning för tolkning av säkerhetsmålen.

2.1 INLEDNING

Målen för en säkerhetsanalys och de kriterier analysens resultat ska bedömas mot styrs i hög grad av myndighetsregleringar.

Utvecklingen av regler och kriterier inom kärntekniken präglas av ett nära samarbete inom internationella organisationer. Som en bakgrund till presentationen av svensk reglering (i avsnitt 2.3) ges därför i avsnitt 2.2 en sammanställning av internationella regler och bestämmelser som påverkar säkerhetsmål och acceptanskriterier för ett djupförvar. Här presenteras också regler som Sverige genom EU-medlemskapet åtagit sig att följa samt internationella och regionala avtal som Sverige ratificerat.

Den svenska regleringen kring kärntekniska anläggningar, dit även ett djupförvar räknas, är på många punkter mycket välutvecklad. Regleringen rör framför allt driften av kärntekniska anläggningar. Ett djupförvar skiljer sig från andra anläggningar genom att dess säkerhet ska visas inte bara för driftperioden utan även för en mycket lång tidsperiod därefter. En ytterligare skillnad är att den säkerhetsnivå som anläggningen utformas för inte kan etableras på basis av drifterfarenheter utan måste baseras på prognoser.

För den långsiktiga säkerheten är den detaljerade regleringen idag mindre utvecklad. För närvarande finns dels ett gemensamt kriteriedokument från nordiska myndigheter, dels en preliminär utgåva av en kommande föreskrift från Strålskyddsinstitutet. Dessa dokument presenteras närmare i avsnitt 2.3.

Oavsett hur framtida nationell och internationell reglering på området kommer att utformas måste den omsättas i praktiska tillämpningar. I avsnitt 2.4 behandlas hur säkerhetsmål och acceptanskriterier ska kunna överföras till olika mätetal för en säker funktion i förvaret. Här diskuteras även kollektivdos till andra organismer än människor.

I avsnitt 2.5 jämförs eventuell långsiktig stråldosbelastning från ett djupförvar med den belastning som uppkommer i andra steg i kärnenergiproduktionen. Avsnittet vill ge en helhetssyn på strålskyddsfrågorna.

I avsnitt 2.6 sammanfattas slutligen normsystem och praxis för kemiskt hälso- eller miljöfarliga ämnen som kan förekomma i ett djupförvar.

2.2 INTERNATIONELLA REGLER OCH REKOMMENDATIONER

2.2.1 Inledning

Strålskyddsfrågor behandlas inom en rad internationella organ. Internationella regler och rekommendationer ligger ofta till grund för nationell lagstiftning. I detta avsnitt ges en översikt av det internationella samarbetet vad gäller säkerhetsmål och acceptanskriterier för ett djupförvar. Här presenteras också regler som Sverige genom EU-medlemskapet åtagit sig att följa samt internationella och regionala avtal som Sverige ratificerat.

2.2.2 IAEA – FNs internationella atomenergiorgan

IAEA utarbetar rekommendationer och handledningar i frågor som rör kärnkraft. De fastställs efter omfattande remissgranskning, och utges under rubriken Safety Series. Publikationerna i Safety Series är numera indelade i kategorier enligt ett hierarkiskt system. Överst finns de så kallade Safety Fundamentals som behandlar övergripande mål och principer. Sedan följer flera nivåer med alltmer detaljerade handledningar och rekommendationer. Rekommendationerna återfinns ofta som krav från svenska myndigheter i samband med tillståndsgivning.

För hantering av avfall finns ett antal rekommendationer, tillämpliga på en deponeringsanläggning. En stor del av de kriterier som tas upp i IAEA:s publikation "Criteria for Underground Disposal of Solid Radioactive Wastes" /2.2-1/ återfinns i de nordiska säkerhetsmyndigheternas dokument som diskuterats i avsnitt 2.3.

Inom ramen för IAEA finns även ett övervakningsprogram för klyvbart material. Syftet är bl a att kontrollera spridningen av plutonium. Även använt kärnbränsle inkluderas i programmet. Rekommendationer förväntas komma för hanteringen av avfall i ett djupförvar. Bl a kommer frågan om vid vilket skede i deponeringen övervakningen ska upphöra att tas upp.

IAEA har ett särskilt program för säkerhetsnormer för radioaktivt avfall, Radioactive Waste Safety Standards, RADWASS. Här finns bl a en kommitté som arbetar med deponering.

2.2.3 Europeiska unionen

Då Sverige blev medlem i den Europeiska unionen ratificerades också Euratomfördraget. Fördraget reglerar de ömsesidiga förpliktelserna i kärntekniska frågor mellan medlemsländerna. Det innebär att normer på strålskyddsområdet som överenskomms inom EU är bindande även för Sverige.

ICRPs (se nedan) rekommendationer, vilka sedan tidigare tillämpas av SSI, kommer att innefattas i "Basic Safety Standards" för strålskyddsområdet som EU planerar att ge ut.

Euratomfördraget föreskriver även att ett medlemsland ska informera EU-kommissionen om planerade åtgärder för deponering av radioaktivt avfall.

2.2.4 ICRP, International Commission on Radiological Protection

ICRP grundades 1928 och publicerar generella rekommendationer och regler för strålskydd vid användningen av radioaktiva ämnen. Sedan 1950 utges sammanfattningstidskriften "Annals of the ICRP". Olika ämnesområden samlas till så kallade "ICRP Publications". Flera av dessa är relevanta för avfallshantering och för säkerhetsfrågor kring ett djupförvar. ICRP:s rekommendationer har utgjort en viktig grund för de svenska och nordiska rekommendationer för högaktivt långlivat avfall som presenteras i avsnitt 2.3.

2.2.5 Nordiskt samarbete

Informationsutbyte och gemensamma forskningsinsatser inom de nordiska länderna kanaliseras genom Nordisk Kärnsäkerhetsforskning, NKS. NKS finansieras genom de nordiska ländernas säkerhetsmyndigheter samt av företag och institutioner aktiva inom kärnkrafts-, kärnforsknings- och strålskyddsområdena.

NKS driver forskningsprojekt och studier inom områden av gemensamt intresse. I projekten deltar representanter för kärnkraftföretag, myndigheter och forskningsinstitutioner, bl a med syftet att uppnå ökad förståelse och samordning mellan de nordiska länderna. Även områden som ligger vid sidan av den rena kärntekniken, men som kan vara av väsentlig betydelse för bland annat djupförvaret, behandlas. Ett exempel är metoder för bevarande av information för framtiden. /2.2-2/. Denna studie är en av flera inom NKS-programmet för avfall och rivning.

2.3 SVENSKA OCH NORDISKA MYNDIGHETERS KRITERIER FÖR DJUPFÖRVARING AV LÅNGLIVAT AVFALL

2.3.1 Inledning

Kärnteknisk verksamhet regleras i Sverige i ett antal lagar, förordningar och föreskrifter. De viktigaste övergripande lagarna är naturresurslagen, kärntekniklagen och strålskyddslagen.

Utgående från framför allt kärntekniklagen och strålskyddslagen finns en rad förordningar och myndighetsföreskrifter som detaljerat reglerar kärnteknisk verksamhet. Regleringen rör framför allt driften av anläggningar.

Ett djupförvar skiljer sig, som nämnts, från andra anläggningar genom att dess säkerhet ska visas inte bara för driftperioden utan även för en mycket lång tidsperiod därefter. Hittills tillämpade förordningar och föreskrifter för kärntekniska anläggningar behöver därför kompletteras med reglering för den långsiktiga funktionen hos anläggningen. Kraven i kommande lagstiftning på området förväntas harmoniera med de krav som idag ställs på drift av kärntekniska anläggningar.

Bland myndighetsföreskrifterna för **drift** av kärntekniska anläggningar är framför allt följande tillämpliga på driften av ett djupförvar:

- Regleringar av utsläpp av radioaktiva ämnen till luft och vatten vid drift, SSI FS 1991:5
- Bestämmelser om högsta tillåtna stråldoser för personal, SSI FS 1989:1
- Bestämmelser om strålskydd för personal, SSI FS 1994:2
- Bestämmelser om strålskyddsföreståndare vid anläggning, SSI FS 1994:1

Ur dessa regleringar kan vissa grundläggande principer för även den långsiktiga säkerheten utläsas. Regelverket behöver dock detaljeras och kompletteras med bl a praktiska kriterier för säkerhetsanalyser. För den långsiktiga säker-

heten finns för närvarande (oktober 1995) två mer detaljerade dokument vad gäller svenska förhållanden:

- En första remissutgåva av en kommande föreskrift från Strålskyddsinstitutet: "Statens strålskyddsinstitutets skyddskriterier för omhändertagande av använt kärnbränsle" /2.3-1/.
- Ett gemensamt kriteriedokument från de nordiska ländernas strålskydds- och kärnsäkerhetsmyndigheter, i svensk översättning: "Slutförvaring av högaktivt radioaktivt avfall, Några grundkriterier" /2.3-2/.

Även Kärnkraftinspektionen, SKI, utger från 1994 egna författningar. Arbetet pågår för närvarande med en författning om riktlinjer för säkerhetsanalyser. Innehållet väntas specificera vad en säkerhetsanalys ska innehålla samt hur den ska kvalitets-säkras och dokumenteras.

I fortsättningen av avsnitt 2.3 diskuteras samlat Strålskyddsinstitutets remissutgåva och det gemensamma nordiska kriteriedokumentet.

2.3.2 Övergripande mål

Det nordiska kriteriedokumentet formulerar tre mål för utformningen av djupförvaring av högaktivt avfall.

Ett **allmänt mål** är att skydda människors hälsa och miljön, samt att begränsa belastningen på kommande generationer.

Beträffande den **långsiktiga säkerheten** sägs att hälsorisker och miljöeffekter från slutförvaret för all framtid ska vara låga och inte högre än dem som skulle accepteras idag. Bedömningen av om ett visst utförande av förvaret är acceptabelt ska baseras på den radiologiska påverkan som kan uppkomma, oavsett nationsgränser.

Vad gäller **belastningen på framtida generationer** ska denna begränsas. Detta ska ske genom att vid en lämplig tidpunkt åstadkomma en slutförvaring, som inte kräver långsiktig övervakning eller aktiva underhållsåtgärder för att vidmakthålla säkerheten.

Även SSI-dokumentet uttrycker direkt eller indirekt dessa mål.

2.3.3 Strålskyddskrav

De strålskyddsprinciper och strålskyddskrav som generellt tillämpas i såväl det nordiska kriteriedokumentet som i SSI-dokumentet utgår från de grundläggande principer för skydd mot joniserande strålning som ställts upp av ICRP /2.3-3/. Dessa är:

- a Verksamheten ifråga ska vara berättigad.
- b Strålskyddet ska vara optimerat.
- c Individens skydd ska säkerställas genom dosgränser.

Berättigande

Båda dokumenten konstaterar att punkt a inte är tillämplig på ett djupförvar. Omhändertagandet av avfallet är en nödvändig följd av driften av kärnkraftverk.

Skyddsoptimering

Punkt b motsvarar vad som benämns ALARA-principen, dvs strålexponeringen ska vara "As Low As Reasonably Achievable". Det kan även uttryckas så att alla åtgärder som är försvarbara med hänsyn till kostnader och sociala faktorer ska vidtas för att minska den totala stråldosbelastningen.

Principen är tillämplig på såväl driftskedet som förvarsskedet. Principen kan tillämpas på förvarsskedet bl a vid beslut om förvarets principiella utformning. Genom att fastställa principerna för förvarets funktion men hålla kvar möjligheter till alternativa utformningar, bibehålls de frihetsgrader som så småningom kan användas för att optimera utförandet under utbyggnad och drift, för att på bästa sätt uppfylla kriteriet ovan.

Dosgränser, nordiska rekommendationer

Punkt c är tillämplig såväl under driftskedet som på längre sikt. Tillämpningen på sikt kan göras genom att jämföra beräknade individuella doser med accepterade gränsvärden.

Vad gäller dosgränser delar de nordiska rekommendationerna in tiden i de ca 10 000 första åren samt tiden därefter.

För **de inledande ca 10 000 åren** sägs att individuella stråldoser som under normala förhållanden kan förväntas på grund av utsläpp från förvaret, ska understiga 0,1 mSv/år.

Dessutom ska sannolikheten för och konsekvenserna av oväntade allvarligt störande händelser studeras, diskuteras och presenteras kvalitativt. När det är möjligt ska de även behandlas kvantitativt. Den årliga sannolikheten liksom konsekvensen uttryckt som indviddos ska då uppskattas. Dessa faktorer multipliceras till en risk som inte får överstiga risken vid 0,1 mSv/år.

Dosen 0,1 mSv/år härrör från ICRPs rekommendation att stråldosen till befolkningen orsakad av verksamhet med joniserande strålning inte ska överskrida 1 mSv/år. Eftersom en individ kan utsättas för strålning från flera olika källor, får varje enskild orsak, enligt nordiska rekommendationer, endast bidra med 10 % av den totala acceptabla dosen.

Dosberäkningar förutsätter kännedom om biosfären på förvarsplatsen. Det kräver även kännedom om delar av samhällslivet, bl a människans utnyttjande av naturen. I framtiden kan osäkerheterna kring biosfär och samhälle efterhand bli så stora att användning av doser som mått på hälsorisker blir meningslöst. Andra mätetal än stråldoser måste användas för tidsperioder när avgörande förändringar i framför allt miljön kan ha förväntats inträffa. Exempel på sådana förändringar är landhöjningar och klimatförändringar, i synnerhet en förväntad istid.

För **tider över ca 10 000 år** ställer det nordiska kriteriedokumentet därför krav på att radioaktiva ämnen som frigörs från förvaret inte får "leda till några signi-

fikanta ändringar i strålmiljön. Detta förutsätter att inflödena av de deponerade radionukliderna till biosfären, genomsnittligt under långa tidsperioder, skall vara lågt jämfört med respektive inflöde av naturligt förekommande alfa-strålare.”

Dosgränser, SSI-kriterier

Även i SSI:s remissutgåva diskuteras regler för dosberäkningar i olika tidsperspektiv. Skyddskriterier för personal och allmänhet redovisas. Tidsperspektivet uppdelas i

- a de inledande 1 000 åren efter förslutning,
- b tiden efter de inledande 1 000 åren fram till nästa istid samt
- c tiden efter nästkommande istid.

För epokerna a) och b) kommer kvantitativa analyser, inklusive beräknade doser till kritiska grupper av människor under olika förutsättningar att krävas. ”Uppskattningar av individdoser för tiden fram till 10 000 år från förslutning bör redovisas som bästa uppskattning, dvs varken över- eller underskattning, med angivande av bedömda felgränser.” Gränsen 1 000 år mellan a) och b) motiveras med att viktiga kortlivade nuklider som Cs-137 och Sr-90 avklingat efter ca 1 000 år. Högre krav kommer därför att ställas på redovisningen för de inledande 1 000 åren.

För c) krävs endast kvalitativa bedömningar för att ge en bild av vad som kan hända med förvaret. ”Denna diskussion skall inkludera överväganden som beaktar risken för förhöjda utsläpp. Jämförelser i siffror, t ex beträffande möjliga utläckage av radioaktiva ämnen, kan ge indikationer på hur gott skyddet är som bakgrund för den kvalitativa bedömningen.”

Dessutom sägs: ”För mycket långa tider, där långlivade radionuklider dominerar, skall skyddet i möjligaste mån följa samhällets principiella skyddstänkande för stabila ämnen som kan orsaka cancer eller arvsskador, t ex vissa tungmetaller.”

Strålskyddsinstitutet konstaterar att framtida stråldoser i några beräkningsfall kan överstiga stipulerade gränser. ”För sådana fall skall sannolikheten för den händelsekedja som leder fram till nämnda stråldos diskuteras.” Om sannolikheten bedöms vara låg kan den högre dosen i vissa fall komma att accepteras av SSI.

SSI-dokumentet hänvisar dessutom till gällande bestämmelser för **kollektivdoser** till personal och allmänhet för kärnteknisk verksamhet. I SSI FS 1994:2 anges kollektivdosbegränsningen $2 \text{ manSv}/(\text{år} \cdot \text{GWa})$ för personal, i SSI FS 1991:5 anges $5 \text{ manSv}/(\text{år} \cdot \text{GWa})$ till allmänheten. Kollektivdoserna ska summeras över 500 år. Gränsvärdena gäller summan av alla steg i energiproduktionen. Även avfallshanteringen och den inledande fasen efter tillslutning av förvaret ska alltså inkluderas. Revideringar av dessa författningar kommer att visa hur kollektivdosberäkningar ska göras för ett djupförvar.

För **individdos** ska samma dosgränser gälla för personal som vid annan verksamhet (SSI FS 1989:1) och $0,1 \text{ mSv}/\text{år}$ (SSI FS 1991:5) till allmänheten (kritisk grupp).

Skydd av naturen

För att säkerställa skyddet av naturen krävs i Strålskyddsinstitutets remissutgåva analys av spridning och ackumulation i olika media i ekosystem. Utgångspunkten är att den biologiska mångfalden ska bevaras. Kvantitativa krav kan komma att ställas i likhet med de nuklidflödesgränser som anges i det nordiska kriteriedokumentet, eller som stråldos till indikatororganismer, om det inte är uppenbart att påverkan på naturen är relativt liten.

2.3.4 Krav och rekommendationer för förvarsutformning och säkerhetsredovisning

De gemensamma nordiska kriterierna behandlar också förvarets utformning och säkerhetsredovisning.

Utformning

Beträffande förvarets utformning sägs: "Den långsiktiga säkerheten hos slutförvaret skall baseras på flera passiva barriärer arrangerade så att:

- bristfälligheter i en av barriärerna inte nämnvärt försämrar helhetsfunktionen hos systemet
- realistiska geologiska förändringar förväntas sannolikt endast delvis påverka barriärsystemet."

Som komplement till denna s k flerbarriärprincip, anges ett antal rekommendationer för lämpligt utförande. Rekommendationerna behandlar de faktorer som idag anses mest betydelsefulla för att åstadkomma ett säkert djupförvar, förutsatt att det byggs i kristallint berg.

Rekommendationerna anknyter till utformningen i KBS-3 (se kapitel 5) och behandlar hur de krav på skyddsoptimering och stråldosgränser som diskuteras ovan kan uppfyllas. Vissa rekommendationer är platsspecifika, och ingår i förutsättningarna för lokaliseringsprocessen medan andra är systemspecifika och behandlar de tekniska barriärernas funktion.

Säkerhetsredovisning

För säkerhetsredovisningen anges principer för hur en redovisning ska genomföras för att en god utvärdering ska vara möjlig. Dessa kräver bl a säkerhetsanalyser, som grundats på kvalitativa bedömningar och på kvantitativa resultat från beräkningsmodeller. Modellernas giltighet ska verifieras så långt det låter sig göra. Dessutom ställs krav på ett kvalitetssäkringsprogram för att uppfylla konstruktionsförutsättningar och tillämpliga föreskrifter.

2.4 PRAKTISKA TILLÄMPNINGAR

Olika former av regleringar av säkerhetsredovisning för ett djupförvar måste konkretiseras till faktiska beräkningsfall, mätetal och funktionsindex. I detta avsnitt redovisas de mätetal som SKB planerar att använda för att redovisa förva-

rets funktion och radiologiska säkerhet. Planerna är en konsekvens av bl a de rekommendationer och kriterier som presenterades i avsnitt 2.3.

Förvarets säkerhet kommer också att redovisas genom en diskussion om tilltron till att de radionuklider som kan ge höga doser kvarhålls och kan avklinga utan att nå biosfären och människan. En redovisning av i vilka barriärer som olika potentiellt dosgivande nuklider avklingar kommer att göras för olika fall. Även marginaler och reserver för dessa barriärers säkerhet kommer att redovisas.

Doser till människor

För tidsperioden från försegling av förvaret fram till inledningen av en antagen glaciation (om ca 10 000 år) beräknas och redovisas dosinteckning till individer i kritisk grupp i Sv/år under sannolika förhållanden i platsspecifik biosfär. Samma beräkningar genomförs om möjligt även för mindre sannolika scenarier. Om möjligt kommer sannolikheten för att dessa scenarier ska inträffa att uppskattas. Doserna kommer i första hand att jämföras med gränsvärdet 0,1 mSv/år.

Populationsdoser integrerade över 500 år regionalt och globalt kommer också att beräknas. Dessa kommer att jämföras med de aviserade reviderade gränsvärdena från SSI.

Utflöden av radionuklider från förvaret

För tiden efter 10 000 år beräknas flöden av alfastrålande nuklider i Bq/år till biosfären. Flödena kommer att jämföras med naturliga flöden och även med gränsvärden om sådana föreligger. För att göra det möjligt att jämföra de beräknade utsläppen under de båda epokerna kommer också en indikativ dos att anges baserat på en viktning av utsläppta radionuklider med dosfaktorerna för en standardbiosfär, se vidare avsnitt 11.5.

Doser i naturen

Max stråldos i känsliga biotoper eller till specifika organismer beräknas eller uppskattas och jämförs med naturliga förhållanden för att visa att skyddet av naturen är säkerställt.

Uppskattningar av osäkerheter kommer att åtfölja samtliga redovisade resultat.

2.5 HELHETSSYN PÅ STRÅLSKYDDSFRÅGORNA

2.5.1 Inledning

Djupförvaring av kärnkraftens avfall kan eventuellt ge ett tillskott till strålningsbelastningen för människa och miljö. För att kunna värdera detta eventuella tillskott krävs en helhetssyn på strålskyddsfrågorna, där hänsyn tas till doser orsakade av olika led i energiproduktionen.

Individ- och/eller kollektivdoser från brytning av uranmalm, produktion av uran, transporter, bränsleproduktion, drift, mellanlager, avfallsbehandling och djupförvar bör redovisas. Bidragen från olika verksamheter bör uttryckas som dos per producerad enhet energi. En diskussion om tidsperspektiven för strålriskerna från de olika momenten bör också ingå. Dessutom bör sannolikheten för och konsekvenserna av missöden i olika produktionssteg uppskattas. Även sannolikhet för och konsekvenser av möjliga framtida utvecklingsvägar för ett djupförvar och liknande anläggningar för långvarig lagring av radioaktivt avfall bör diskuteras.

Resultaten av en sådan genomgång kan sedan relateras till den strålmiljö människan idag lever i.

En form av sammanvägning av radiologiska risker från olika verksamheter finns uttryckt i svensk lagstiftning kring utsläpp vid normaldrift av kärntekniska anläggningar. Dosgränsen till kritisk grupp i omgivningen är där satt till 0,1 mSv/år oavsett antalet anläggningar på en viss plats.

För många av de verksamheter som diskuteras nedan kan den radiologiska påverkan delas in i bidrag från dels den operativa delen av verksamheten, dels ett långsiktig passivt skede därefter. Gruvdrift utgör ett exempel på detta. Dels utsätts personal för strålning vid driften, dels uppstår gruvavfall som utgör en långsiktig strålningsrisk. Ofta kan åtgärder som innebär en högre dos under den operativa fasen leda till en reduktion av dosen från det långsiktiga skedet. En helhetssyn på verksamheten förutsätter att man kan finna ett lämpligt sätt att balansera riskerna i dessa två skeden.

2.5.2 Radiologiska risker i kärnbränslecykeln

Dagens tillstånd till drift av kärnkraftreaktorer innebär att de för energiproduktionen nödvändiga verksamheterna att utvinna uran, att tillverka reaktorbränsle och att efter energiutvinningen ta hand om det använda kärnbränslet och annat avfall är berättigade. Kärnenergiproduktion förutsätter

- uranbrytning,
- isotopanrikning,
- bränsletillverkning,
- kärnenergiproduktion,
- omhändertagande inklusive eventuell behandling av radioaktivt avfall samt
- transport och lagring.

Verksamheterna är ofta geografiskt och tidsmässigt starkt separerade och har mycket olika industriell karaktär. Som en följd av olikheterna i verksamhetsdelarna är även de radiologiska konsekvenserna av normaldrift och eventuella missöden av mycket olika karaktär. Det gäller bl a

- de radionuklider som är involverade,
- exponeringsförhållanden för driftpersonal och omgivande befolkning under normaldrift,
- typer av missöden som kan uppkomma och de potentiella risker dessa kan ge upphov till för personal och omgivande befolkning,
- fördelningen över tiden av exponering och risk för missöden etc.

Uranbrytning

Vid uranbrytning är det huvudsakligen avfallet från brytningen som medför en strålningsrisk. Framställning av ett ton uran genererar omkring 50 ton fast avfall. Detta avfall hanteras olika beroende på var brytningen sker och de risker som samhället utsätts för är därmed också olika. Skillnaden ligger i hur avfallshögarna täcks över. I svenska Ranstad gav t.ex övertäckning och andra åtgärder en reduktion av utsläppen på 400 ggr /2.5-1/.

Risken för samhället orsakas av att malmen efter brytning får en ökad exponerad yta mot grundvatten och luft. Detta leder till en snabbare frigörelse av dels radionuklider (uranisotopernas dotterprodukter), dels andra kemiska ämnen som bly, kadmium, kvicksilver och salpetersyra. Spridningen sker dels via suspenderat material i luften, dels via lakning med ytvatten, eventuellt till grundvatten. Miljöpåverkan sträcker sig över mycket lång tid – upp till miljoner år. UNSCEAR har uppskattat kollektivdosen till personal i urangruvor till 150 manSv/GWa /2.5-2/. Dosen kommer huvudsakligen från radon.

Isotopanrikning

Isotopanrikning är en process som producerar avfall i form av utarmat uran vilket huvudsakligen är en kemisk risk. På lång sikt kan det även behöva beaktas att dotterprodukter bildas i det utarmade uranet. Ett litet utsläpp av urandöttrar som bildats under tiden som förflutit mellan anrikningen av malmen vid gruvan och isotopanrikningen förekommer också. Denna tid kan ibland vara flera år /2.5-2/.

Bränsletillverkning

Bränsletillverkning är en, radiologiskt sett, relativt riskfri hantering. De risker som förekommer är i samband med utsläpp av stoft, vilket marginellt kan påverka omgivningsdosen /2.5-2/.

Energiproduktion

Vid energiproduktionen produceras en mängd olika radionuklider. Utsläppen vid normaldrift följs noga upp. Vid eventuella haverier kan större utsläpp förekomma. I svenska reaktorer kommer doserna dock sannolikt aldrig att kunna ge akut skada.

Vid normaldrift släpps mycket små mängder långlivade nuklider ut. Eftersom avfallshanteringen dessutom behandlas separat, blir tidsperspektivet för utsläpp under normaldrift relativt kort, ca 40 år. Ett undantag utgör C-14 som beräknas ge någon manSv globalt under en relativt lång tidsperiod, ca 10 000 år. Tritium och Kr-85 beräknas ge 0,1 manSv/GWa. På längre sikt är det I-129, Ra-226 och Np-237 som ger kollektivdoser i storleksordningen mmanSv/(år · GWa) /2.5-2/.

Olyckorna vid Windscale, Three Mile Island och Tjernobyli beräknas ha givit 2 000, 40 respektive 600 000 manSv /2.5-2/.

Driftavfall

I Sverige mellanlagras avfall från kärnkraftdriften vid respektive verk. Driftavfallet konditioneras för slutlagring på platsen som ytdeponi eller för transport till slutförvaret för radioaktivt driftavfall, SFR, för deponering. Eventuellt utsläpp från delarna utanför SFR behandlas inom energiproduktionen. Säkerhetsanalyserna för SFR indikerar att riskerna är mycket låga för utsläpp och konsekvenserna blir mycket små /2.5-3/.

Långlivat avfall

Långlivat avfall (använt kärnbränsle och reaktordelar) mellanlagras i det centrala mellanlagret för använt bränsle, CLAB. Detta moment ger relativt små mängder driftavfall som hanteras på samma sätt som det från energiproduktionen. Den vidare hanteringen av det långlivade avfallet dvs inkapsling och i synnerhet djupförvaring diskuteras utförligt i hela denna rapport. För de jämförelser som görs i detta avsnitt används uppskattningar från UNSCEAR av kollektivdos från långlivat avfall /2.5-2/.

Upparbetning

Upparbetning kan ingå i hanteringen av använt kärnbränsle. Upparbetning är inte aktuellt i Sverige men tas ändå med för jämförelse. Vid upparbetning beräknas utsläpp ske av avfallets hela innehåll av Kr-85 och av 70-80 % av innehållet av C-14 /2.5-1/. Detta beräknas ge 50 manSv globalt under en period av ca 10 000 år. Upparbetning ger också långlivat avfall.

Transporter

Total kollektivdos för transporter har uppskattats till 1,3 mmanSv/TWh varav olyckor står för 10^{-7} manSv/TWh /2.5-4/.

Sammanfattning av kollektivdoser

Kollektivdoser från olika steg i kärnbränslecykeln sammanfattas i tabell 2.5-1. För att ytterligare sätta resultaten i perspektiv bör populationsdoserna i tabellen jämföras med naturligt förväntat årsmedelvärde av dos till samma populationer.

Det är även av intresse att jämföra värdena med de doser som alternativ energiproduktion medför. Koleldning beräknas t ex ge ca 20 manSv/GWa. Utsläppen av Cs-137 från förbränning av biobränsle uppskattas vara ca 500 ggr högre än från kärnkraftdrift räknat per enhet producerad energi.

Tabell 2.5-1. Sammanfattning av kollektivdoser i kärnbränslecykeln

	Tidsperspektiv (år)	Global kollektivdos (manSv/GWa) UNSCEAR
Uranbrytning	1 000 000	150
Anrikning	100	
Bränsletillverkning	100	0,003
Energiproduktion	100	1,3
Driftavfall	1 000	0,5
Långlivat avfall	1 000 000	0,05
Upparbetning	100	50

Tillåtna kollektivdoser för kärnenergiproduktion

I SSI FS 91:5 anges tillåten kollektivdos för kärnenergiproduktion till 5 manSv per år och GW installerad effekt.

Om man under driften utnyttjat i genomsnitt 2 manSv per år under driften under 30 år för 10 GW skulle det ge ett utrymme på $3 \cdot 30 \cdot 10$ manSv eller totalt 900 manSv som kan tänkas utfalla under ca 10 000 år. I genomsnitt skulle det alltså innebära ca 0,09 manSv/år.

Slutligen ska konstateras att det idag inte finns någon entydig definition av begreppet kollektivdos. En beskrivning av problematiken finns i /2.5-5/. En av de faktorer som behöver diskuteras är den tid som dosen ska summeras för. I uppgifterna från UNSCEAR i tabell 2.5-1 har alternativet 10 000 år använts.

2.5.3 Tillämpning av helhetssyn på strålskyddsfrågor

En möjlig utgångspunkt för de fortsatta diskussionerna om hur en helhetssyn ska tillämpas inom området radioaktivt avfall ges nedan:

- 1 Hantering och slutförvaring ska inte ge väsentligt större dostillskott än andra delar av kärnbränslecykeln – vare sig som individdos eller kollektivdos för allmänhet eller personal sysselsatt i verksamheten.
- 2 Kollektivdoserna ska i normalfallet rymmas inom de riktlinjer som angivits för kärnbränslecykeln totalt för en 500-årsperiod när som helst.
- 3 Vid hantering och förberedelser för slutlig förvaring av avfallet ska åtgärderna utformas så att man får en rimlig avvägning (balans) mellan riskerna för dostillskott (bestrålning) till följd av behandlingen och förberedelser i jämförelse med den framtida eventuella risk som man avser minska med åtgärden.

Det är inte rimligt att ta en relativt sett större nutida risk för att eliminera en mycket mindre framtida risk.

Avvägningen kan ske med kvantitativa eller kvalitativa analyser.

2.6 KEMISKA RISKER

De kemiska ämnen som kan tänkas bli kvar i ett djupförvar kan utgöra en risk utöver den radiologiska. Det gäller i första hand ämnen som tillhör grupperna:

- Tungmetaller
- Aromater och klorerade aromater
- Polyaromatiska kolväten, PAH
- Fenoler
- Ftalater och ytaktiva ämnen
- Klorerade kolväten
- Cyanid, fluorid m fl salter

För att få en överblick över vilka regler och riktlinjer som finns och som kan komma att införas har en inventering gjorts av nationella gränsvärden föreskrivna av Livsmedelsverket och Naturvårdsverket samt av EU-direktiv och andra länders riktlinjer /2.6-1/.

De gränsvärden som sätts upp bygger på att det finns ett tröskelvärde, som kan definieras på olika sätt;

- halter under vilka inga effekter observerats
- den lägsta halt där skadlig effekt påvisats eller
- den halt för vilken cancerrisken motsvarar acceptabel livstidsrisk (ofta används värdet en på miljonen).

Gränsvärden erhålls genom att dividera aktuellt tröskelvärde med en risktypsberoende säkerhetsfaktor.

För vatten finns dels gränsvärden för dricksvatten från brunnar och ytvatten, dels utsläppsgränser för vatten direkt till recipient eller via avloppsverk. Gränsvärden och riktlinjer är inte heltäckande men olika typer av värden är relativt samstämmiga och varierar vanligen mindre än en storleksordning.

Föroreningar i mark och sediment saknar f n fasta regler, undantaget reglering för mark i Nederländerna. Här har man tagit fasta på att jordens multipla funktionalitet ska behållas utan att orsaka någon oacceptabel risk till människan.

För vattenburet utsläpp till vattenrecipient går det att sammanställa en uppsättning gränsvärden. Rimligen kan ett utsläpp som ligger under dessa gränsvärden för vatten aldrig skapa en oacceptabel föroreningssituation för mark eller sediment.

Kemiskt hälso- och miljöfarliga ämnen diskuteras närmare i avsnitt 4.4. Sådana ämnen förutses i första hand finnas i det avfall som ska deponeras i förvarsdelarna för ”annat långlivat avfall”.

3 METODIKBESKRIVNING

I kapitel 3 redovisas SKBs metodik för aktuell säkerhetsutvärdering.

Den historiska bakgrunden av tidigare designstudier och till dessa knutna funktions- och säkerhetsanalyser redovisas i ett inledande avsnitt och en orienterande bild ges av hur arbetet lett fram till systemets generella utformning. Det ska dock tydligt framgå att den säkerhetsanalys som redovisas granskar säkerheten för det valda och presenterade systemet. Möjligheter till alternativa utformningar presenteras i den mån det finns behov att redovisa kvarstående frihetsgrader, eller anpassningsmöjligheter till plats specifika förhållanden.

Därefter diskuteras det säkerhetsmässiga underlag som krävs för de aktuella besluten, och den inriktning och de avgränsningar för säkerhetsrapporten detta leder till. Avgränsningarnas effekt på säkerhetsanalyserna diskuteras, varefter analysgången i funktions- och säkerhetsanalyserna presenteras. I avsnittet ges också en överblick av hur säkerheten i det passiva förvaringsskedet anknyter till hanteringen av avfallet och till uppbyggnaden och kontrollen av förvar och säkerhetsbarriärer. Avsnittet avslutas med en rekapitulation av radiologiska säkerhetsmål och acceptanskrav enligt kapitel 2 och en redovisning av de specifika mätetal som utnyttjas i den aktuella säkerhetsredovisningen.

Därpå följande avsnitt redovisar de metoder som utnyttjats för att systematiskt granska de förhållanden i djupförvaret som är viktiga för funktion och säkerhet, samt de händelser och processer som kan påverka förvarets utveckling med tiden. Begrepp som processsystem, normalscenario, referensscenario etc definieras. Möjligheter att täcka in rimliga utvecklingsvägar för förvaret med olika scenarier/beräkningsfall diskuteras. Likaså diskuteras på ett övergripande plan, möjligheterna att kvantifiera de olika scenarierna samt hur denna kvantifiering beror av informationstillgång och aktuellt arbetsskede.

I följande avsnitt görs en genomgång av de osäkerheter som kommer in vid genomförandet av säkerhetsanalysen. Möjligheterna för att kvantifiera eller avgränsa dessa diskuteras liksom också möjligheterna att integrera dem i en total osäkerhetsuppskattning.

I ett avslutande avsnitt ges en beskrivning av de kvalitetsrutiner som tillämpats vid genomförandet av respektive säkerhetsanalys.

I denna rapport redovisas i avsnitt 3.1 de tre nivåer av säkerhetsfunktioner som bygger upp djupförvarets säkerhet och den principiella gången för att genomföra en säkerhetsanalys. I avsnitt 3.2 diskuteras därefter syftet med de två närmast liggande säkerhetsrapporterna, SR-I och SR-D, samt den preliminära omfattning och de avgränsningar som förutses för dessa rapporter.

Avsnitt 3.3 redovisar den utveckling av scenariemetodik som för närvarande pågår inom SKB. En tillämpning av denna metodik på den i SR 95 redovisade systemutformningen redovisas i kapitel 9.

Avsnitt 3.4 diskuterar de osäkerheter som finns i en säkerhetsanalys. Kapitlet utgör en lägesredovisning av arbetet med att systematiskt gå igenom samtliga

osäkerheter. Avsikten är att presentera hur olika osäkerheter kommer in i analysen, granska möjligheterna att redovisa eller avgränsa dem, samt diskutera möjligheterna att integrera de olika typerna av osäkerheter.

Samtliga nämnda avsnitten i SR 95 utgör således mer generella genomgångar av vissa metodikfrågor för säkerhetsanalysen än motsvarande avsnitt i kommande säkerhetsrapporter.

3.1 ALLMÄNT OM FUNKTIONS- OCH SÄKERHETSANALYSER

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

För att åstadkomma en långsiktig säkerhet utformas förvarssystemet för att **isolera** det använda kärnbränslet från biosfären. Isoleringen erhålls 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 ska 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 flerbarriärprincipen, dvs att säkerheten inte enbart får vara avhängig av att en ensam barriär fungerar som planerat.

Säkerhetsfunktioner

Säkerhetsfunktionerna påverkas av platsval och layout samt av utformning och dimensionering av de tekniska barriärerna. Funktionerna kan delas upp i 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 mycket långsam transport av radionuklider i närområdet,
- sorption och långsam transport av radionuklider i berggrunden.

Nivå 3 – Gynnsamma recipientförhållanden

De spridningsvägar längs vilka eventuellt frigjorda radionuklider kan nå människan styrs i stor utsträckning av förhållandena på de platser där det djupa grundvattnet först når biosfären (förhållanden som utspädning, vattenanvändning, markanvändning och övrigt utnyttjande av naturresurserna). En gynnsam recipient innebär att stråldosen till människa och miljö begränsas. Recipienten och spridningsvägarna påverkas dock av biosfärens naturliga förändringar.

Säkerhetsanalyser

Förvarets funktion under både förväntade och mindre vanliga förhållanden analyseras genom funktions- och säkerhetsanalyser. I ett skede där systemutveckling och platsvalsprocess pågår erfordras fortlöpande utvärderingar av säkerhet och funktion som ledning för att utforma systemen, för att välja lokaliseringsplats och för att arrangera förvaret så att platsens naturliga barriärer mot spridning utnyttjas på ett effektivt sätt. Sådana fortlöpande analyser av lämpligt avgränsade barriärer eller delsystem under typiska omgivningsförhållanden benämns **funktionsanalyser**.

För att få fram en helhetsbild av förvarssystemets totala funktion måste funktionsanalyserna sammanföras till att omfatta hela systemet. Möjligheterna till olika externa påverkningar måste också analyseras. Slutligen måste förvarets funktion jämföras med säkerhetsmålen. Dessa integrerade analyser benämns **säkerhetsanalyser** och redovisas i säkerhetsrapporter.

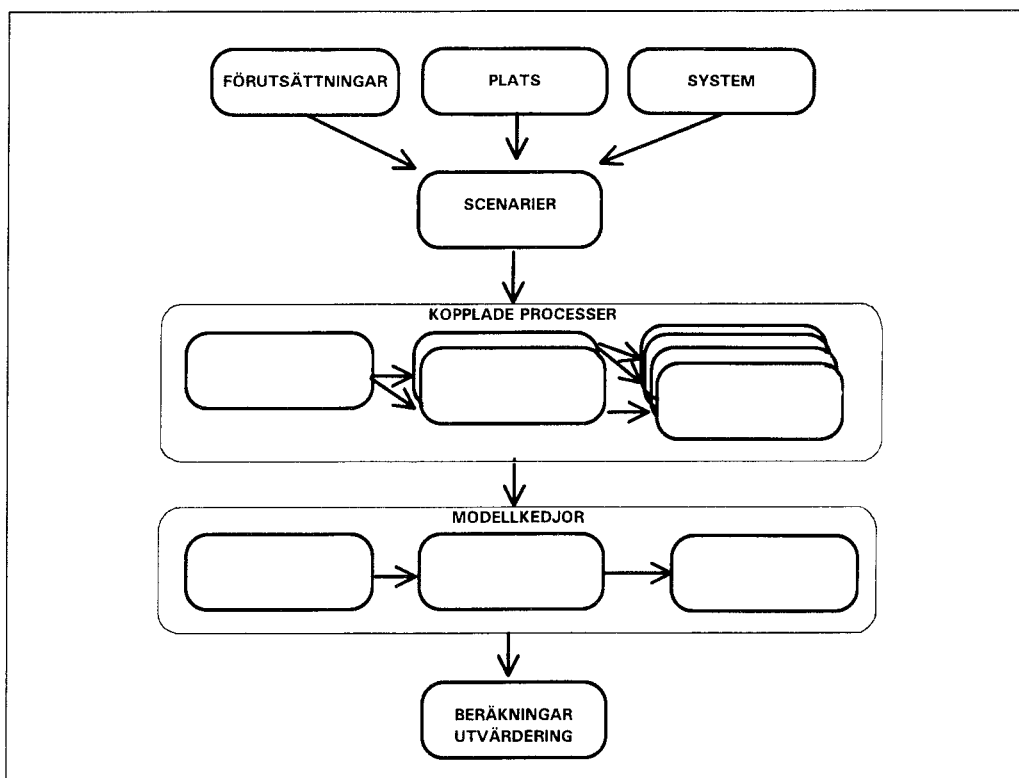
Säkerhetsanalyserna utgår från den förståelse av systemets funktion som erhållits vid funktionsanalyserna eller vid tidigare säkerhetsanalyser. De fokuseras på att klarlägga effekter av det totala förvaret på människan och hennes omgivning samt på hur olika utformningar och dimensioneringar påverkar förvarets integrerade säkerhet.

Många beslut om arbetsinriktning etc. vid utvecklingen av ett förvarssystem måste tas under osäkerhet. Analysarbetet ska därför inte bara kvantifiera förvarets funktion, utan också klarlägga osäkerheterna i analysen och vad dessa osäkerheter har för inverkan på slutsatserna. Utredning av osäkerheterna i analysen och av tilltron till att analysens syfte kan uppnås med hänsyn tagen till osäkerheterna, är en verksamhet som i praktiken inte kan skiljas från övrigt analysarbete.

Oavsett om analyserna genomförs för hela eller delar av systemet eller om de genomförs i ett tidigt eller sent utvecklingsskede, måste de göras på ett systematiskt sätt. En schematisk presentation av systematiken ges i figur 3.1-1. En komplett analys omfattar:

- Definition av analysens syfte.
- Beskrivning av givna förutsättningar för analysen, dvs typer och mängder av radioaktivt avfall, förvarssystemet och dess dimensioner samt förvarets plats och miljö.
- Beskrivning av analysens omfattning och avgränsningar, samt av säkerhetsmål och acceptanskriterier.
- Kvalitativ beskrivning av de processer som tillsammans beskriver förvarets funktion under olika förhållanden. Val av såväl de sannolika som de mindre sannolika eller osannolika förhållanden för vilka systemet/anläggningen ska analyseras (scenarier).
- Detaljerad beskrivning av de tidsberoende processer som vid olika scenarier är väsentliga för förvarets avsedda funktion.
- Val av analysmetod för varje scenario. Eventuellt val av beräkningsmodeller för kvantitativa analyser.
- Genomförande av kvantitativa eller kvalitativa analyser för de valda scenarierna.
- Diskussion av osäkerheterna i kvalitativa och kvantitativa delanalyser och en bedömning av om den totala analysens syfte kan uppnås med hänsyn tagen till osäkerheterna.

För att genomföra arbetet på ett systematiskt och spårbart sätt har metoder för de olika stegen diskuterats och utvecklats inom Sverige, i samarbetet med de större kärnkraftländerna och i internationellt samarbete. De viktigare av metoderna för scenariohanteringen diskuteras vidare i avsnitt 3.3.



Figur 3.1-1. Principiell gång för genomförandet av en säkerhetsanalys. Scenarier beskriver förvarets möjliga utveckling med tiden. Processerna som påverkar säkerheten är ofta inbördes kopplade och kräver därför att stora modellkedjor ställs upp.

3.2 OMFATTNING OCH AVGRÄNSNINGAR FÖR ANALYSEN

Ett flertal säkerhetsrapporter kommer att redovisas som underlag för beslut och tillståndsansökningar i olika steg i arbetet att bygga ett djupförvar i Sverige. Tabell 3.2-1 är tagen ur SKBs FUD-program 95.

Var och en av i tabellen angivna säkerhetsrapporter kommer att ha en huvudinriktning eller specifika avgränsningar som i vissa avseenden kan skilja den från övriga rapporter. För att inte oklarheter ska uppstå vid jämförelser mellan rapporterna eller med rapportmallen är det viktigt att sådana avgränsningar redovisas och motiveras.

En generell avgränsning är att varje säkerhetsrapport behandlar en viss definierad systemutformning eller layout. Känslighetsanalyser kan visa betydelsen av mindre förändringar i vissa mått eller egenskaper i resultatets närhet, men en enskild analys kan inte användas för en optimering av förvaret. Andra generella avgränsningar eller inriktningar kan gälla de tidsperioder som analyserna ska omfatta eller de specifika redovisningskrav som ges i föreskrifter etc. Dessa har diskuterats i kapitel 2.

Tabell 3.2-1. Kommande säkerhetsanalyser

Säkerhetsanalys	Underlag för beslut om.../ tillstånd för...	
	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 av 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

Säkerhetsanalyser som genomförs i olika skeden av systemutformning, platsval och utbyggnad kan alltså ha olika omfattning och vara olika avgränsade. Specifika avgränsningar med hänsyn till olikheter i dataunderlaget kan exempelvis föranleda att olika stora bergvolymmer modelleras. Avgränsningar och inriktningar till följd av att analyser görs i tidiga skeden kan motivera att man begränsar sig till förenklade eller konservativa beskrivningar eller beräkningsmodeller. Komplexa modeller som avses komma till användning i senare skeden kan dock också utnyttjas tidigare för att möjliggöra en granskning av olika modellens beroende av datatillgång.

Platsspecifika förhållanden kan innebära att de geometriska avgränsningarna vid modellering av grundvatten eller radionuklidtransport väljs olika på kandidatplatserna.

Den tydligaste skillnaden mellan olika säkerhetsrapporter uppkommer dock troligen av att de beslut som ska fattas i olika skeden är olika. För att belysa de olikheter som föranleds av skillnader i de beslut som ska tas och behovet att anpassa rapportens omfattning till dessa, diskuteras nedan inriktningar och avgränsningar för de två närmast kommande rapporterna om djupförvarets säkerhet på lång sikt.

Säkerhetsrapport för tillstånd för Inkapslingsanläggningen, SR-I

Rapporten behandlar förståelsen av kapselns långsiktiga säkerhetsfunktion, dvs att isolera det använda bränslet från grundvatten och att fördröja eventuell spridning av radionuklider om isoleringen bryts. Säkerheten utvärderas 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. SR-I ska även redovisa vilka miljöförhållanden som antagits föreligga när funktionskraven för kapseln fastställdes. Dessa ska jämföras med de förhållanden som förekommer i den berggrund som är aktuell för lokalisering av djupförvaret.

Eftersom lokaliseringsprocessen inte förväntas ha hunnit till stadiet att data från kandidatplatser föreligger, 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 samt Stripa och Äspö. De säkerhets- och byggnadstekniska lokaliseringsfaktorerna som redovisades i kompletteringen till FUD-program 92 kommer att detaljeras. Säkerhetsbedömningens känslighet för variationer i dessa faktorer kommer att belysas.

Inriktning och avgränsningar för SR-I:

- Analysen omfattar djupförvaret för använt kärnbränsle, inte förvaret för övrigt långlivat avfall.
- Kapseldata från projekteringen av inkapslingsanläggningen.
- Buffert- och närområdesdata från projekteringen av djupförvaret.
- Fjärrområdet exemplifieras med data från någon av SKBs undersökta platser; variationsbredden för väsentliga data i Sverige redovisas.
- Biosfären integreras i säkerhetsanalysen via typiska biosfärsrecipienter.
- Den säkerhetsmässiga betydelsen av variationen i geodata gafflas in genom parametrarnas variationsbredd.

Säkerhetsrapport för tillstånd för Djupförvaret och detaljundersökningar, SR-D

Rapporten ska redovisa en platsspecifik analys av säkerheten hos ett djupförvar placerat på den kandidatplats som rekommenderas för detaljundersökningar. Endast platser med goda säkerhetsmässiga förutsättningar kan bli aktuella för lokalisering.

En första granskning och jämförelse av kandidatplatser sker i platskaraktiseringsarbetet och därtill hörande funktionsanalyser. Skulle platserna vara likvärdiga sker prioritering med hänsyn till övriga lokaliseringsfaktorer redovisade i kompletteringsrapporten till FUD-program 92.

Säkerhetsrapporten SR-D skall visa förståelsen av platsens roll för den långsiktiga säkerheten, dvs att ge gynsamma förhållanden vad gäller mekanisk stabilitet och kemisk miljö för kapsel och buffert, samt begränsa transporten av radionuklider till biosfären.

Inriktning och avgränsningar för SR-D:

- Analysen omfattar både förvaret för använt bränsle och övrigt långlivat avfall.
- Analysen fokuseras på platsspecifika förhållanden och grundvattenrörelser på kandidatplatsen.
- Förvarsutformning och layout görs platsspecifika.
- Biosfärsrecipienter och spridningsvägar till människan väljs platsspecifikt.
- Den säkerhetsmässiga betydelsen av osäkerheter eller alternativa tolkningar av kandidatplatsens geologiska struktur redovisas och platsens potential att ge en säker slutförvaring utvärderas med hänsyn till kvarstående osäkerheter.

3.3 SCENARIEMETODIK

3.3.1 Inledning

Djupförvaret består av en kedja av barriärer; tekniska, dvs konstruerade av människan, och naturliga. Barriärernas uppgift är att isolera det radioaktiva avfallet (se även kapitel 9). Förutom att isolera avfallet ska barriärerna utformas så att upplösning och transport av radionuklider förhindras och/eller fördröjs. Djupförvaret utformas för att isolera det radioaktiva avfallet tills farligheten avklingat till en nivå som är jämförbar med farligheten hos en naturlig uranfyndighet.

Säkerhetsanalysens syfte är att undersöka om förvarssystemet uppfyller ställda krav för alla realistiska systemtillstånd. För att göra det behövs verktyg/modeller för att simulera och analysera förvarets beteende. En viktig del av säkerhetsanalysen är att sammanställa information om förvarets egenskaper och funktion samt att identifiera de systemtillstånd som bör simuleras och analyseras. Den metodik som används för detta kallas scenariemetodik.

Ett scenario är en beskrivning av en tänkt framtida situation. Begreppet scenario inbegriper både en utveckling utgående från en uppsättning specificerade förutsättningar och den framtida situation denna utveckling leder till. Situationerna kan här beskrivas som tillstånd i förvarets barriärer och flödessystem samt i biosfären. Tillstånden ska vara sådana att de på något sätt kan tänkas påverka barriärernas prestanda och/eller transporten av radionuklider till människan. Ett scenario kan också ha sin utgångspunkt i orealistiska förutsättningar, t ex uteslutande av en barriär eller process. Syftet med att analysera ett sådant

scenario är att visa systemets robusthet och/eller systemets känslighet för osäkerheter i olika barriärprestanda och processer.

De valda scenarierna ska tillsammans ge en rimligt heltäckande bild av systemets tänkbara utvecklingsvägar. För att identifiera dessa scenarier är ett systematiskt tillvägagångssätt, en scenariemetodik, nödvändig. Valet av scenarier bör göras med utgångspunkt från en systematisk beskrivning av systemet och dess utveckling över tiden. En viktig del av scenariemetodiken är att erbjuda ett tillvägagångssätt för att upprätta en sådan systematisk beskrivning.

Valet av scenarier bedöms inte kunna göras på rent objektiva grunder utan måste innehålla ett visst mått av subjektiva bedömningar i form av expertutlåtanden. Scenariemetodiken måste hantera och dokumentera dessa utlåtanden på ett systematiskt sätt.

Hela processen med att upprätta en beskrivning av förvaret, genomföra scenarievalet och beskriva och motivera de valda scenarierna måste dokumenteras. En plan för hur dokumentationen ska gå till ingår också i scenariemetodiken.

Scenariemetodiken är under utveckling. Hittills har utvecklingen skett genom att ett antal metoder prövats. Ett första försök att identifiera scenarier bl a med hjälp av felträdsanalys gjordes 1989 gemensamt av SKB och SKI /3.3-1/. Efter det har den sk influensdiagram-metoden /3.3-2/ och RES-metoden /3.3-3 - 3.3-5/ prövats inom scenariemetodiken. Under arbetets gång har brister och för tjänster identifierats och erfarenheterna har tagits till vara /3.3-6/. En del av de centrala begreppen i den scenariemetodik som idag tillämpas är arv från tidigare prövade metoder.

3.3.2 Viktiga begrepp

FEP

En svår fråga, som delvis ska besvaras med hjälp av scenariemetodiken och dess tillämpning, är om dagens kunskap är tillräcklig för att beskriva förvarets funktion. Har verkligen förvarets alla möjliga utvecklingsvägar övervägts? Har hänsyn tagits till förvarets alla egenskaper och processer? För att besvara dessa frågor har man arbetat med att identifiera de egenskaper, händelser och processer som påverkar förvarets funktion och som kan tänkas förekomma nu eller i framtiden. Dessa benämns med en gemensam term FEP. Benämningen kommer från engelskans Features (karaktäristika, egenskap), Events (händelser) och Processes (processer, förlopp).

Både i Sverige och internationellt har databaser över FEP byggts upp. Identifiering av FEP, kopplingar mellan dem samt den stora och komplexa mängd information som FEP-databaserna utgör har dominerat de scenariemetoder som hittills tillämpats.

Process-system, PS

Redan på ett tidigt stadium identifierades ett behov av att särskilja de FEP som beskriver förvarets karaktäristika och utveckling över tiden från dem som beskriver yttre händelser eller initialvillkor. För att göra denna sortering infördes begreppet Process-system, PS, med följande definition;

Process-systemet är en **organiserad** uppsättning av alla fenomen (FEP) som behövs för att beskriva barriärernas prestanda och radionuklidernas beteende i ett förvar och dess omgivning och som kan förutsägas med åtminstone någon grad av bestämdhet givet en uppsättning yttre villkor.

PS är således en integrerad beskrivning av förvarets centrala egenskaper och processer. Generella villkor vid upprättandet av PS ger förståelse av hur systemet fungerar under olika förhållanden.

Då en beskrivning av PS upprättats kan de FEP som inte tillhör PS betraktas som yttre händelser eller företeelser som kan påverka PS. Sådana yttre FEP kan således sägas beskriva förutsättningarna för ett visst scenario.

Scenario

Mot bakgrund av det som sagts ovan om process-systemet är följande en naturlig definition av ett scenario:

Ett scenario bestäms av en uppsättning yttre villkor som påverkar processerna i PS. De yttre villkoren avgör hur processerna i PS ska kombineras och modelleras när scenariots utveckling beskrivs och dess konsekvenser utvärderas.

Det centrala i scenariet, beskrivningen av den tänkta framtiden, blir förutsättningarna för utvecklingen. Då man talar om val av scenarier för en säkerhetsanalys avses därför ofta val av förutsättningar för scenarier. I det följande kommer termen "scenarioval" ofta att användas i betydelsen "val av förutsättningar för scenarier".

Referensscenario

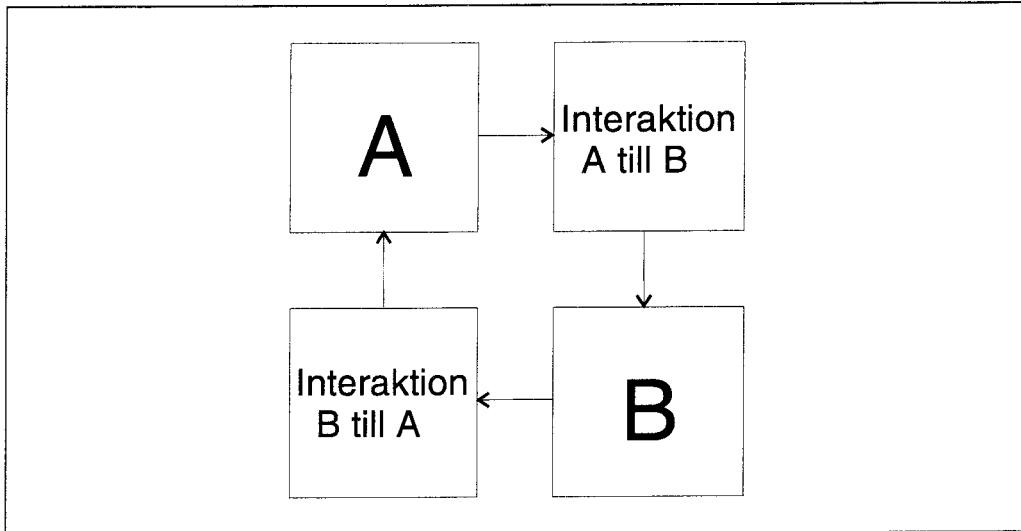
Innan en beskrivning av PS kan upprättas behöver vissa förutsättningar läggas fast. Därför har begreppet referensscenario införts. Ett referensscenario är ett scenario som valts för att ha som jämförelse. I SKBs nuvarande metodik har referensscenariot allmängiltiga förutsättningar. Det ger en generell beskrivning av PS. Inom en sådan beskrivning av PS kan särdrag i många andra scenarier illustreras.

Tidigt identifierades ett behov av att beskriva PS egenskaper och processer på ett överskådligt sätt samt att länka ihop dem i orsaks/verkan-samband. Olika typer av diagram för detta ändamål prövades och den s k RES-metodens interaktionsmatriser ansågs vara de mest ändamålsenliga /3.6-6/. RES-metoden har därför haft ett stort inflytande på den scenariometodik som idag tillämpas av SKB. RES-metodiken och uppbyggandet av en interaktions-matris presenteras kort i nästa avsnitt. I det avslutande avsnittet beskrivs hur den scenariometodik som tillämpas idag är uppbyggd.

3.3.3 RES-metodiken

RES är en akronym för Rock Engineering System. RES beskrivs som en mål-orienterad top-down metod. Med målorienterad avses att analysen ska genomföras mot bakgrund av ett definierat mål. Med top-down avses att problemet först betraktas som en helhet och sedan bryts ned i sina beståndsdelar. I detta avsnitt ges en mycket kort beskrivning av RES-metoden. I avsnitten 9.3 och 9.4 beskrivs hur den tillämpats inom scenariometodiken.

Det grundläggande redskapet inom RES-metoden är interaktionsmatrisen. Diagonalelementen i interaktionsmatrisen utgörs av de begrepp eller fysikaliska variabler som bedöms vara viktiga för det problem som ska analyseras. I övriga element beskrivs interaktionerna mellan diagonalelementen. Interaktionsriktningen är medurs, se figur 3.3-1.

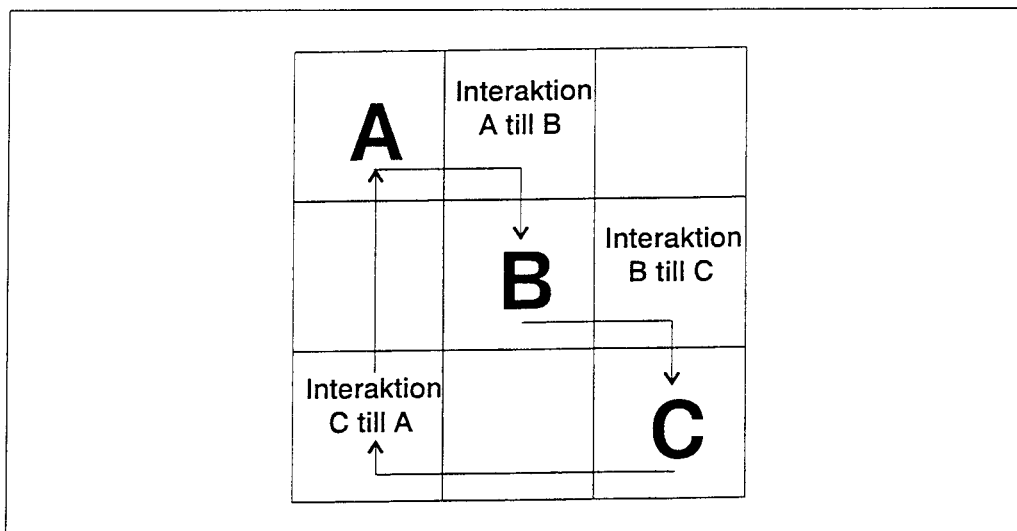


Figur 3.3-1. Interaktionsmatris med diagonalelementen A och B och interaktionerna mellan dem.

En interaktion mellan två diagonalelement kallas binär. Om interaktionsmatrisen består av fler än två diagonalelement kan det ibland existera en samling binära interaktioner på ett sådant sätt att kedjor av interaktioner, s k interaktionsvägar, kan byggas upp. Kedjorna kan ibland slutas. Detta kräver att binära interaktioner förekommer på båda sidor om diagonalen, se figur 3.3-2.

RES-metoden består av följande steg:

- Formulering av problem, mål och förutsättningar för analysen.
- Val av begrepp eller fysiska variabler som ska utgöra diagonalelement, samt deras måttenheter. Om diagonalelementet inte kan beskrivas med ett entydigt mått beskrivs vilka aspekter av det som modelleras. Om diagonalelementet i själva verket avbildar flera variabler med samma namn och/eller måttenheter beskrivs detta.
- Bestämning av interaktioner mellan diagonalelementen.
- Bestämning av hur viktig varje interaktion är med hänsyn till det formulerade målet och den process den representerar. Viktigheten, signifikansen bestäms genom att interaktionen tilldelas en sifferkod enligt följande:
 - 4 kritisk interaktion
 - 3 stark interaktion
 - 2 medelstark interaktion
 - 1 svag interaktion
 - 0 ingen interaktion
- Upprättande av matematiska samband mellan diagonalelementen om detta är möjligt.



Figur 3.3-2. Kedja av interaktioner som bildar ett slutet förlopp.

Om kvantitativa samband kan upprättas mellan diagonalelementen kan matriserna analyseras matematiskt. Inom den scenariemetod som idag tillämpas har det bedömts orealistiskt att upprätta kvantitativa samband mellan samtliga diagonalelement. För en beskrivning av hur analysen går till i ett sådant fall hänvisas därför till /3.3-3 - 3.3-5/. Då kvantitativa samband inte kan upprättas utnyttjas interaktionernas signifikans eller viktighetsgrad vid analysen. Diagonalelementens betydelse för systemet analyseras genom rad- och kolumnsummorna av interaktionskoderna. Radsumman är ett mått på i vilken grad diagonalelementet påverkar det övriga systemet. Kolumnsumman är ett mått på hur känsligt diagonalelementet är för störningar från det övriga systemet.

Scenarioutvecklingen beskrivs genom att utgå från ett speciellt systemtillstånd. En störning påverkar den matris som beskriver systemtillståndet t ex genom förändring av ett diagonalelement. Interaktionerna som utgår från diagonalelementet omvärderas. Påverkan på angripna diagonalelement analyseras. Interaktionerna som utgår från de angripna diagonalelementen omvärderas osv. De viktigaste, kritiska interaktionsvägarna identifieras som de som består av enbart kritiska interaktioner. De mest kritiska interaktionsvägarna anses vara sådana som kan slutas till en slinga av kritiska interaktioner, figur 3.3-3. Det nya systemtillståndet, i synnerhet de kritiska interaktionerna, beskrivs närmare.

RES-metoden och dess interaktionsmatriser är ett mycket kraftfullt redskap för att identifiera och beskriva FEP och deras kopplingar till varandra. Metoden i dess ursprungliga form saknar dock definitioner, metoder och notation för att beskriva förvaret som ett system uppbyggt av systemdelar som genom sina egenskaper och prestanda bär upp systemfunktionen, samt hur systemet utvecklas över tiden. Funktionsanalysen görs idag av experter som söker förutsättningar som kan påverka systemets funktion.

A	2	→	4	4
4	←	B	3	1
2	1	C	4	1
	↑	4	←	D
2		2	3	F

Figur 3.3-3. Mycket kritisk kedja av interaktioner i en RES-matris.

3.3.4 Idag tillämpad scenariemetodik

SKBs scenariemetodik så som den utvecklats fram till idag omfattar följande steg:

- En systematisk beskrivning av egenskaper, händelser och processer som kan påverka förvarets funktion och deras koppling till varandra genom upprättande av ett antal interaktionsmatriser.
- En metod för dokumentation av interaktionsmatriserna, inklusive koppling till befintlig FEP-databas.
- En plan för hur expertutlåtanden ska hanteras vid dokumentationen av interaktionsmatriserna.
- Val av förutsättningar för scenarier.
- Beskrivning och motivering av scenarier.
- Kvalitativ analys med hjälp av interaktionsmatrisen. Dokumentation av hur interaktionsmatriserna ändras för olika scenarier.

Upprättandet av interaktionsmatriserna har två huvudsyften:

1. att visa att inga FEP har glömts bort samt
2. att identifiera viktiga interaktioner och interaktionsvägar.

Byggandet av matriserna anses dessutom ge ökad förståelse för systemet och underlätta kommunikationen mellan olika experter.

I samband med att interaktionsmatriser upprättas beskrivs och dokumenteras diagonalelementen och interaktionerna. I dokumentationen ingår en kort beskrivning, kopplingar till någon befintlig FEP-databas samt beskrivning av om, och i så fall hur, diagonalelementet eller interaktionen kan modelleras i den

kvantitativa utvärderingen inom säkerhetsanalysen. Dessutom anges vem eller vilka som gjort beskrivningen och deras kompetens.

Interaktionsmatriser för PS kan inte upprättas förrän yttre förutsättningar valts. Tanken är att de upprättade matriserna ska kunna användas för analys av ett stort antal scenarier, valet av förutsättningar för matriserna görs därför så allmängiltigt som möjligt. Avsikten är också att systemets normala funktion klart ska framgå av de upprättade matriserna. Matriserna beskriver PS för ett referensscenario. De definitioner av interaktionernas viktighetsgrad som ges inom RES-metoden måste förtydligas. De interaktioner som ges högst viktighetsgrad, dvs kritiska interaktioner, är sådana som ska hanteras i den kvantitativa utvärderingen av förvaret, dvs på något sätt ingå i den kedja av beräkningsmodeller som används vid den kvantitativa utvärderingen. De interaktioner som ges lägst viktighetsgrad är sådana som kan ignoreras. De mellanliggande stegen, stark respektive medelstark interaktion, är sådana som måste beaktas men inte nödvändigtvis behöver ingå i den kvantitativa utvärderingen.

Val av scenarier kan inte göras direkt ur interaktionsmatriserna. Med hjälp av interaktionsmatriserna beskrivs hur diagonalelementen förändras och interaktionerna ändrar viktighet då en uppsättning förutsättningar byts mot en annan. Analysen av systemets funktion och utveckling görs inom den idag tillämpade scenariemetodiken helt och hållet av experter. Valet av förutsättningar som kan påverka systemet, dvs scenarier, görs också av experter. Interaktionsmatriserna fungerar som kontroll-listor för experterna då scenarievalet väl är gjort och för att peka ut de interaktioner som är viktiga i det valda scenariot. Interaktionsmatrisen kan dock indirekt stöda scenarievalet då byggandet av den ger kunskap om systemet.

Hur metoden tillämpats i praktiken redovisas i kapitel 9. Det bör åter påpekas att scenariemetodiken är under utveckling. Resultatet av tillämpningen av RES-metoden på förvarssystemet kommer att granskas och utvärderas.

3.4 OSÄKERHET OCH VALIDITET

3.4.1 Inledning

Tilltron till en säkerhetsanalys är en produkt av tilltron till en rad såväl kvalitativa som kvantitativa faktorer som ingår i eller utgör förutsättningar för analysen. Det gäller allt från övergripande kvalitativa frågor om hur väl vetenskapen av idag förmår beskriva viktiga processer i förvarets funktion till detaljerade kvantitativa osäkerheter, exempelvis i värden på olika parametrar som utgör indata till en modellberäkning.

I detta avsnitt görs en systematisk genomgång av olika typer av osäkerhet och hur de kommer in i säkerhetsanalysens olika steg. Genomgången är översiktlig till sin natur. Mer detaljerade diskussioner om osäkerheter kopplade till olika förvarsdelar eller processer förs i de avsnitt av säkerhetsrapporten som behandlar respektive del eller process. Avsnittet avslutas med en diskussion om hur osäkerheterna kan sammanvägas för att ge en integrerad bild av tilltron till en säkerhetsanalys och dess resultat. En mer detaljerad samlad diskussion om osäkerheter i säkerhetsanalysen och metoder för att hantera dessa förs i /3.4-1/. Liksom scenariemetodiken är hanteringen av osäkerheter under utveckling.

3.4.2 Osäkerheter i analysens förutsättningar

Till grund för en säkerhetsanalys ligger dels en kunskapsmässig bas som är hämtad från olika vetenskaper relevanta för förståelsen av förvarets utveckling, dels en beskrivning av förvarssystemet.

Osäkerheter i beskrivningen av förvarssystemet

Beskrivningen av förvarssystemet kan indelas i

- en beskrivning (karakterisering och mängder) av det avfall som ska deponeras,
- en given förvarsutformning, dvs en beskrivning av det system av barriärer som ska skydda mot spridning av radioaktiva ämnen samt
- en beskrivning av en specifik plats till vilken förvaret tänks lokaliserat.

En detaljerad beskrivning av förvarssystemet innehåller en rad uppgifter som används som indata i beräkningarna i säkerhetsanalysen.

Avfallets karakteristik och mängd bestäms bl a av omfattningen av det svenska kärnkraftprogrammet, såväl historiskt som i framtiden. Karakteriseringen innehåller uppgifter om bränsletyp, utbränningsgrad, kemisk sammansättning etc. Osäkerheter i beskrivningen diskuteras i kapitel 4. Med dagens förutsättningar för det svenska kärnkraftprogrammet kan de kvantitativa osäkerheterna antas minska med tiden. Dessa kan vidare ofta behandlas med vedertagna statistiska metoder. Osäkerheterna i beskrivningen av bränslets fysiska och kemiska egenskaper är av mer kvalitativ natur och svårare att behandla. Beskrivningen ligger i säkerhetsanalysen till grund för en beräkning av ett detaljerat radionuklidinventarium samt för modellering av förändringar av bränslets egenskaper över tiden, upplösning mm.

Förvarsutformningen med dess olika barriärer (bränslematris, kapsel, buffert, närberget) beskrivs utförligt i främst kapitel 5. Här förekommer en rad parametrar som alla är behäftade med osäkerheter. Osäkerheterna hänför sig inte till olika valmöjligheter beträffande utformningen utan till den grad av säkerhet med vilken olika parametrar i en vald utformning kan bestämmas. Även osäkerheterna beträffande förvarsutformningen är huvudsakligen kvantitativa till sin natur och låter sig ofta behandlas med statistiska metoder. Osäkerheterna bestäms ofta av kvaliteten i olika produktions- och kontrollprocesser. Det gäller bl a kopparkapselns och bentonitbufferns egenskaper.

Beskrivningen av den **specifika plats** till vilken förvaret tänks lokaliserat består av **en geosfärsdel och en biosfärsdel**. Vad gäller geosfärsbeskrivningen (kapitel 6) ligger inte endast data från geologiska undersökningar till grund för analysen utan även en **tolkning** av dessa data som resulterar i en beskrivning av geosfären. I en sådan beskrivning ryms bl a stora strukturelement i berget, större enskilda sprickor, sprickzoner, bergartsfördelningar och topografi. Osäkerheterna i vissa av dessa faktorer kan vara betydande och svårkaraktiserade. Förutom att tillgängliga geologiska data är behäftade med osäkerheter som ger osäkerheter i en given tolkning, kan alternativa tolkningsmöjligheter för en och samma uppsättning geologiska data finnas. Även geosfärens utveckling i tiden i form av exempelvis berggrörelser, behöver beskrivas. Geosfärsbeskrivningen med dess osäkerheter ligger i säkerhetsanalysen till grund för en matematisk

modell av geosfären med hjälp av vilken grundvattenflöde och radionuklidtransport beräknas.

En karakterisering av biosfären på den aktuella förvarsplatsen (kapitel 8) omfattar bl a grundvattenrecipienter, struktur och omsättningar hos det ekologiska systemet och människans utnyttjande av naturen. Även förändringar i tiden av biosfären behöver uppskattas. Karakteriseringen av biosfären med dess osäkerheter ligger i säkerhetsanalysen till grund för en matematisk modell av spridning och omsättning av radionuklider i biosfären.

Kvaliteten i den kunskapsmässiga basen

Kunskap från ett stort antal vetenskapsgrenar används i en säkerhetsanalys. Denna kunskap kan sägas vara en av grundförutsättningarna för en analys. Bland de dominerande områdena finns olika grenar av fysiken, kemin, biologin, geologin och matematiken.

Omfattningen av det vetenskapliga kunnandet och olika vetenskapsområdens varierande mognadsgrad påverkar således säkerhetsanalysens kvalitet. Detta är naturligtvis svårt att uttrycka på ett precist sätt. Man behöver dock alltid vara medveten om och ödmjuk inför det faktum att det kan finnas brister i vår nuvarande kunskap och att detta utgör ett moment av osäkerhet i analysen. Den kommer bl a till uttryck i diskussionen om fullständigheten i scenariobeskrivningen nedan.

3.4.3 Kvalitativ beskrivning, scenarier

Baserat på de förutsättningar som beskrivs i föregående avsnitt görs i säkerhetsanalysen en översiktlig och kvalitativ sammanställning av de egenskaper, processer och händelser som på olika sätt inverkar på förvarets utveckling. I den metodik som idag tillämpas i SKBs säkerhetsanalyser samlas denna information till ett sk process-system som schematiskt kan beskrivas i matrisform. Process-systemet i dess grundform beskriver förvarets utveckling under generella och sannolika omständigheter. För detta används benämningarna normal- eller referensscenario.

Andra scenarier definieras genom att välja andra, mindre sannolika, omständigheter för beskrivningen, se vidare kapitel 9. Detta leder till en modifiering av process-systemet och alltså till en förändring i beskrivningen av förvarets förväntade funktion. Ett scenario kan alltså sägas vara en integrerad bild av förvarets utveckling, givet en bestämd uppsättning omständigheter. Beskrivningen fås genom att studera process-systemet sedan omständigheterna lagts fast. I en säkerhetsanalys görs ett urval av scenarier som ska ge en rimlig täckning av förvarets olika tänkbara utvecklingsvägar.

Osäkerheter i den kvalitativa beskrivningen och scenariovalet

Vad gäller process-systemet står man inför frågan om beskrivningens fullständighet. Är alla relevanta processer medtagna? Är vidare de ingående processerna och deras inbördes beroenden riktigt förstådda och beskrivna? Problemet anknyter till diskussionen om mognadsgraden hos olika vetenskapsgrenar som beskrivs bland förutsättningarna för säkerhetsanalysen.

Detta slag av kvalitativa osäkerheter kring fullständigheten i process-systemet kan delvis reduceras genom ett metodiskt tillvägagångssätt i arbetet. Vidare kan resultat uppnådda med olika metoder jämföras. Det kan även vara värdefullt om resultat från olika oberoende expertgrupper, som arbetar med samma eller olika metoder, kan jämföras.

Även valet av scenarier, som utförs av expertgrupper, är behäftat med osäkerheter av kvalitativ natur. Ger valet av scenarier en i någon mening täckande bild av möjliga utvecklingsvägar för förvaret? En mer ingående diskussion om detta förs i avsnitt 9.5.

3.4.4 Modelleringar

Inom ramen för de valda scenarierna väljs ett antal beräkningsfall för att belysa förvarets funktion kvantitativt. Relevanta delar av process-systemet modelleras matematiskt. Det första steget i formulerandet av en matematisk modell kan sägas vara en konceptualisering, dvs en identifiering och beskrivning av de vetenskapliga lagar och begrepp modellen sedan baseras på. Till konceptualiseringen kan också räknas begrepp av mer matematisk natur, exempelvis lineariseringar av icke-linjära förlopp och andra matematiska förenklingar eller abstraktioner.

Eftersom förståelsen för de processer som ska modelleras sällan är fullständig finns en osäkerhet i konceptualiseringen. Denna kan främst hanteras genom **modellvalidering**, dvs modellens förutsägelser jämförs med den del av verkligheten (experimentella data) den ska avbilda. Olika former av modellvalidering är den huvudsakliga metoden att hantera konceptuell osäkerhet, bl a genom att diskriminera mellan alternativa konceptuella modeller.

Den konceptuella modellen behöver för detta först omsättas i en matematisk modell som vanligen uttrycks i någon form av datorkod. Även i denna process finns ett moment av osäkerhet som kan hanteras med **verifiering**, dvs olika former av tester av att datormodellen "räknar rätt".

Konceptuell osäkerhet kan ibland hanteras genom att använda koncept som är orealistiskt ogynnsamma med avseende på förvarets säkerhet. Så kan t ex fenomen som har gynnsamma effekter på förvarets säkerhet försummas. Ett exempel på detta är att barriärfunktionen hos de kapslingsrör av Zircaloy som omger varje bränsleelement försummas. På så sätt kringgår man konceptuell osäkerhet kring upplösningsprocesser hos Zircaloy. Genom en sådan **konservativ behandling** reduceras inte i sig osäkerheten i konceptualiseringen, snarare minskar osäkerheten med avseende på säkerhetsanalysens syfte, att visa under vilka omständigheter förvaret är säkert.

De modeller som används i säkerhetsanalysen verifieras och valideras. Resultaten beskrivs i valideringsdokument med fastlagt format. Validiteten hos olika modeller diskuteras mer konkret i kapitel 11.

3.4.5 Beräkningar, indata

Med användande av verifierade modeller genomförs de identifierade beräkningsfallen, ofta med flera modeller kopplade i kedjor, se avsnitt 12.3 för ett exempel. Indata till modellerna hämtas till stora delar från den beskrivning av förvarssystemet som utgör förutsättningen för analysen. Dessa är behäftade

med olika typer av osäkerheter. Två huvudsakliga osäkerhetskällor är här begränsad mätnoggrannhet och variabilitet.

Noggrannheten i värdet för en parameter begränsas av hur välutvecklade metoder som finns för att mäta parametern ifråga, noggrannhet hos mätinstrument etc. Med **variabilitet** avses att en viss parameters värde varierar i rummet eller tiden. Även om man har mycket stor noggrannhet i bestämningen i en punkt i rummet eller tiden råder osäkerhet om parametervärdet i andra punkter. Naturligtvis kan en osäkerhet orsakas av en kombination av noggrannhet och variabilitet.

I den mån osäkerheter i indata till en modell kan kvantifieras i form av stokastiska fördelningar kan det även vara möjligt att uttrycka beräkningsresultatet som en stokastisk fördelning, dvs osäkerheter i indata avspeglas kvantitativt i osäkerheter i beräkningsresultatet. Om en sådan **probabilistisk behandling** inte kan genomföras fullt ut är det ändå ofta möjligt att ange resultatet som ett intervall vars storlek är relaterad till osäkerheterna i indata.

Betydelsen av en viss parameters osäkerhet för beräkningsresultatet kan också studeras med **sensitivitetsanalys**, dvs genom att låta en parameter variera kring ett givet värde och studera den resulterande variationen i beräkningsresultatet.

Sensitivitetsanalys är nära besläktad med **variationsanalys**. Där låter man en parameter anta en rad olika, inte nödvändigtvis närliggande, värden och studerar inverkan på resultatet.

Numeriska osäkerheter kan också hanteras genom att man tilldelar en parameter behäftad med osäkerheter ett värde som ur säkerhetsmässig synpunkt är ogynnsamt. På så sätt försäkras man sig om att säkerhetsanalysens förutsägelser om förvarets funktion inte blir för optimistiska samtidigt som osäkerheten hanteras. Man kan emellertid här ställas inför problemet att slutresultatet av beräkningen kan bli så kraftigt påverkat av ”ogynnsamma” värden att inverkan av andra faktorer på förvarets säkerhet blir otydlig.

3.4.6 Sammanvägning

En säkerhetsanalys innehåller således såväl kvalitativa som kvantitativa osäkerheter. Sammanvägningen av osäkerheter i analysens resultat kräver därför dels en diskussion kring de kvalitativa osäkerheterna, dels en presentation av numeriska osäkerheter i beräkningsresultaten.

Diskussionen om osäkerheter behöver alltid göras i ljuset av analysens syfte. Graden av osäkerheter som kan accepteras i resultatet av en säkerhetsanalys av ett djupförvar beror delvis på i vilken av de olika faser av planering, projektering, konstruktion, idrifttagande och förslutning som säkerhetsanalysen kommer in. En större osäkerhet i beskrivningen av platsen för djupförvaret kan exempelvis accepteras i tidigare planeringsskeden då platsen är mindre väl undersökt eller inte ens slutgiltigt fastlagd. Osäkerheterna måste dock i varje fas på lämpligt sätt visas vara av sådan art och storlek att de inte förhindrar att arbetet med förvaret går vidare.

De **kvalitativa osäkerheterna** i analysen kan redovisas genom resonemang kring den använda metodikens förmåga att ge en täckande bild av process-systemet och av förvarets tänkbara utvecklingsvägar. Även värderingar av mognadsgraden hos relevanta vetenskapsgrenar kommer in i sådana resonemang. Valet av scenarier och beräkningsfall behöver också motiveras med resone-

mang, liksom den grad av validering som varit möjlig att uppnå för använda beräkningsmodeller. Ytterst är det dock svårt att strikt värdera de kvalitativa osäkerheterna. Det kommer till exempel aldrig att vara möjligt att i sträng mening bevisa fullständigheten hos process-systemet. Strävan i diskussionen av osäkerheterna måste istället vara att visa att kunskapen är tillräcklig för analysens syfte.

Med diskussionen om kvalitativa osäkerheter som bakgrund kan sedan **kvantitativa osäkerheter** behandlas i utvärderingen av analysen. Givet vissa numeriska osäkerheter i indata till beräkningarna kan, som beskrivits ovan, kvantitativa osäkerheter uttryckas i beräkningsresultaten. Slutresultatet av beräkningarna är i allmänhet ett mått som kan jämföras med något fastlagt acceptanskriterium. Om osäkerheterna i beräkningsresultatet kan uttryckas i form av en stokastisk fördelning kan ett konfidensintervall för resultatet räknas fram.

En väl genomförd och avvägd diskussion av de olika typerna av osäkerheter bör alltså ge en god uppfattning om tilltron till säkerhetsanalysen och dess resultat, såväl kvalitativt som kvantitativt.

4 ANVÄNT KÄRNBRÄNSLE OCH ÖVRIGT LÅNGLIVAT AVFALL

I kapitel 4 ges en beskrivning av det använda kärnbränsle och övrigt avfall som ska deponeras i djupförvaret. Kapitlet delas upp i tre avsnitt omfattande använt kärnbränsle, annat långlivat radioaktivt avfall resp övrigt toxiskt avfall. Beskrivningen avser de olika avfallstypernas fysiska och kemiska form, samt mängder och innehåll av viktigare radionuklider.

Avsnittet om använt bränsle innehåller också en diskussion om bränslets struktur: sprickor i bränslekutsar, bränslefragmentens storleksfördelning, yta och porositet samt egenskaper hos gapet mellan bränsle och kapslingsrör. Dessutom beskrivs fördelning av fissions- och aktiveringsprodukter inne i bränslet och i de konstruktionselement som tas in i kapseln.

Modeller för och beräkningar av nuklidinventarier och resteffekter både för det använda bränslet och övrigt långlivat avfall redovisas, samt de urvalskriterier som använts för att bestämma vilka radionuklider som ska inkluderas i analysen.

I denna rapport redovisade bränslemängder och utbränningar har hämtats ur PLAN 94. Motsvarande information för annat långlivat avfall och övrigt toxiskt material är baserat på de förstudier av dessa avfallstyper som pågår inom SKB. Materialet kan påverkas av kommande energibeslut.

4.1 INLEDNING

Använt kärnbränsle samt långlivat låg- och medelaktivt avfall är de två avfallskategorier som ska deponeras i ett djupförvar. Mängder sammansättningar och andra uppgifter av betydelse för en analys av den långsiktiga säkerheten hos ett djupförvar diskuteras i det följande för de två avfallskategorierna. Sist i kapitlet beskrivs kort sådana giftiga eller miljöförstörande egenskaper hos material som deponerats i djupförvaret som inte är relaterade till radioaktivitet.

4.2 ANVÄNT KÄRNBRÄNSLE

Använt kärnbränsle utgör huvuddelen av det avfall som ska deponeras i ett djupförvar. För att genomföra en säkerhetsanalys behövs uppgifter om mängder och sammansättningen av radionuklider hos avfallet. Även uppgifter om avfallets kemiska och fysikaliska struktur behövs för en säkerhetsanalys.

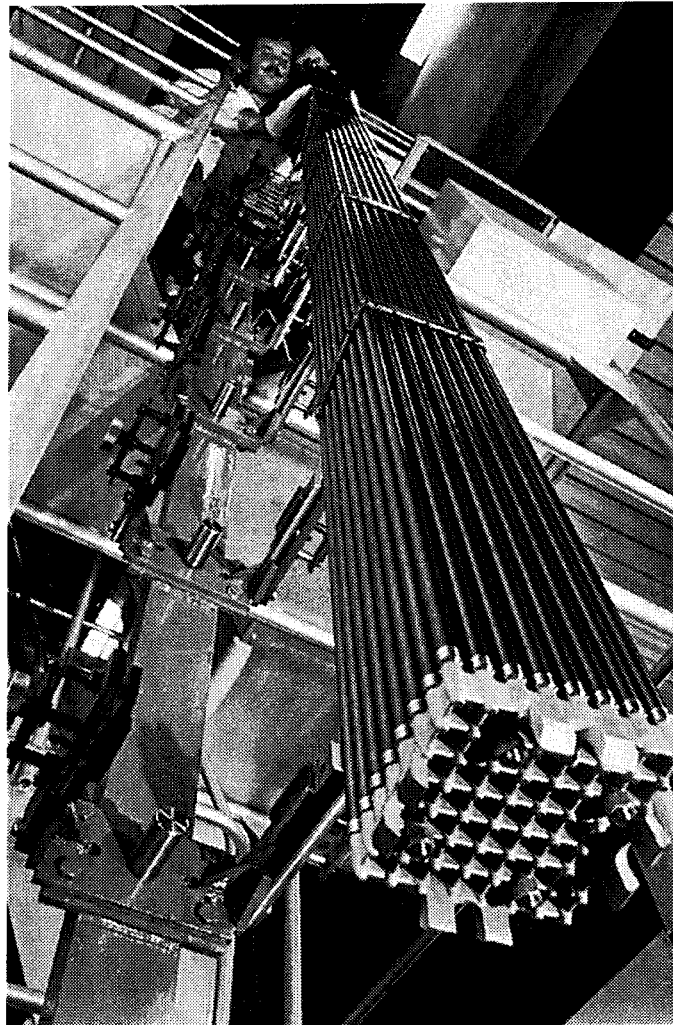
I det följande visas hur man stegvis når fram till nödvändiga data med utgångspunkt i bl a driftdata för det svenska kärnkraftsprogrammet.

Bränsleelementens utseende berörs på flera ställen i dessa avsnitt. I figur 4.2-1 visas en bild av ett bränsleelement.

4.2.1 Mängder och utbränningsgrader

SKB lämnar årligen en redovisning av erhållen och förväntad produktion av energi och avfall i det svenska kärnkraftsprogrammet, de s k PLAN-rapporterna. Redovisningen baseras på ett antal grundläggande uppgifter och antaganden om reaktorernas drifttid och tillgänglighet. Uppgifterna om bränslemängder och bränslets utbränning i SR 95 är hämtade ur PLAN 94 /ref 4.2-1/.

I PLAN 94 uppskattas totala bränslemängder för tre olika alternativ för det svenska kärnkraftsprogrammet, tabell 4.2-1. Den totala energiproduktionen beräknas bli 2000 TWh om alla reaktorer stängdes år 2010, 1610 TWh vid 25 års drift av alla reaktorer och 2620 TWh vid 40 års drift.



Figur 4.2-1. Bränslelement av typen SVEA-64.

Tabell 4.2.1 Förväntade bränslemängder för tre driftalternativ

Fall	Mängd uran (ton) Uttaget t o m 1993	Totalt
Drift till 2010	2 800	7 800
Drift 25 år	2 800	6 500
Drift 40 år	2 800	9 900

För fallet med drift till år 2010 är ca 5 900 ton av avfallet av BWR- typ och 1 800 ton av PWR- typ. I samtliga driftalternativ ingår 20 ton avfall från den avställda tungvattenreaktorn i Ågesta och 23 ton använt MOX-bränsle.

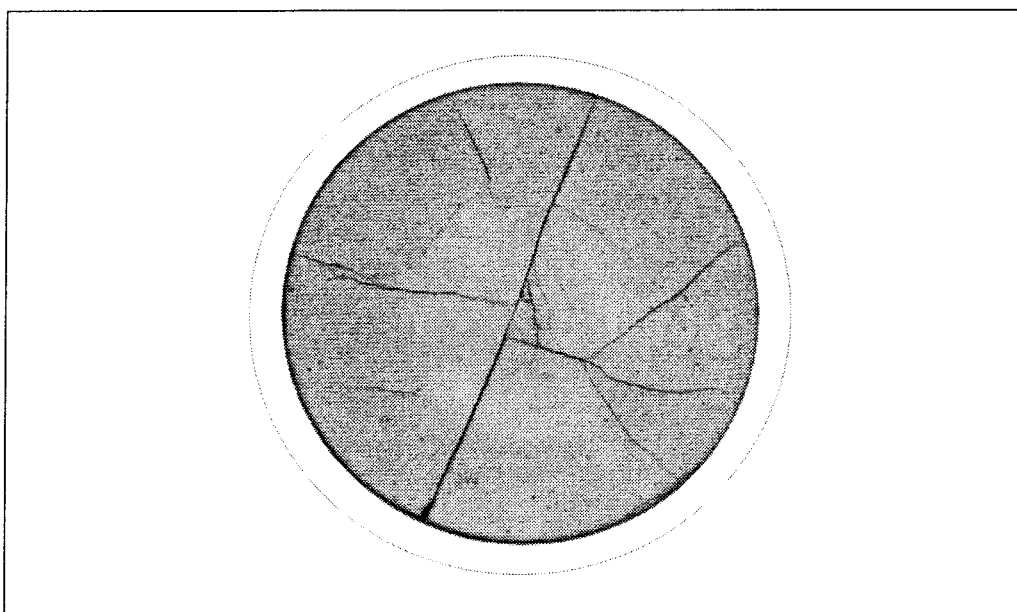
Uppskattningarna för framtida tillkommande mängder bygger på en medelutbränningsgrad av 38 MWd/kgU för BWR och 41 MWd/kgU för PWR.

4.2.2 Bränslets fysikaliska och kemiska struktur

Den fysikaliska och kemiska strukturen hos bränslet är utgör grunden för modellering av bränsleupplösning i en säkerhetsanalys. Underlaget i detta avsnitt är huvudsakligen hämtat från referens 4.2-2.

Fysikalisk struktur

Under start och stopp av en reaktor utsätts bränslet för termiska belastningar vilket gör att bränslekutsarna spricker. Den största delen av bränslet finns som fragment som är större än 2 mm för PWR och 4 mm för BWR. Figur 4.2-2 visar en bränslekuts som spruckit under drift.



Figur 4.2-2. Bränslekuts som spruckit under drift. Utbränningsgrad: 49MWd/kgU. Förstoring 6 ggr.

Det använda bränslets specifika yta är beroende på bränslefragmentens storlek. Mycket små fragment (7–20 μm) har specifika ytor på omkring 3 000 cm^2/g (BET), medan större fragment har ytor på 50–100 cm^2/g .

Kapslingsrören i bränsleelementen motverkar radionuklidtransport i ett förvar. Skadefrekvensen hos kapslingsrören är därför av intresse. Andelen stavar med kapslingsskador är hittills mycket låg. Ca 500 skadade stavar av totalt ca 1 miljon använda har hittills rapporterats.

Rim-effekten

I alla lättvattenreaktorbränslen bildas en sk rim-zon längst ut på bränslekutsarna. Denna zon är typiskt 20–40 μm tjock. I rim-zonen är utbränningen ca 25 procent högre än medelutbränningen, vid en medelutbränning av 40 MWd/kgU. I denna är också α -aktiviteten, porositeten och andelen tyngre aktinider högre än i kutsens inre delar.

Nuklidernas kemiska form i bränslet

Radioaktiva nuklider i form av fissionsprodukter och aktinider bildas i bränslet genom fission och neutroninfångning. Den kemiska form dessa nuklider får i bränslet bestäms av diverse kemiska processer, av termisk diffusion samt av masstransportprocesser orsakade av termiska gradienter under reaktordriften.

Fissionsprodukterna kan grovt indelas i fyra grupper efter deras kemiska form i bränslet, se tabell 4.2-2. Det är dock inte alltid entydigt vilken grupp en viss nuklid tillhör, speciellt kan det vara svårt att avgöra om en nuklid bör ingå i grupp 2 eller grupp 3.

Tabell 4.2-2 Indelning av fissionsprodukter efter deras kemiska form i bränslet.

Grupp	Element
1. Fissionsgaser och andra flyktiga fissionsprodukter	Kr, Xe, Br och I
2. Fissionsprodukter som bildar metalliska utfällningar	Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb och Te
3. Fissionsprodukter som bildar oxidutfällningar	Rb, Cs, Ba, Zr, Nb, Mo och Te
4. Fissionsprodukter som finns lösta som oxider i bränslematrisen	Sr, Zr, Nb, lantaniderna: Y, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm och Eu

Aktiniderna finns som lösta oxider i matrisen på samma sätt som fissionsprodukterna i grupp 4.

4.2.3 Definition av typbränsle

För beräkningarna av radionuklidinventarium och resteffekt i en säkerhetsanalys väljs ett typbränsle. Egenskaperna hos typbränslet ska vara representativa för de bränslesammansättningar och utbränningsgrader som beskrivs i

avsnitt 4.2.1. Bränslemängden i beräkningarna ska svara mot vad som ryms i den kapsel som används i förvaret.

Typbränslet i SR 95 utgörs av tolv BWR-element av typ Svea 64 med en utbränning av 38 MWd/kgU taget ur drift år 1985. Förslutningsdatum för förvaret, dvs startpunkten för redovisningen av det beräknade radionuklidinventariet, har satts till år 2050.

Typbränslet i SR 95 baseras på samma antaganden som för SKB 91 med skillnaden att antalet bränsleelement satts till tolv jämfört med åtta i SKB 91 /4.2-3/. Skillnaden beror på att en annan kapselutformning används i SR 95.

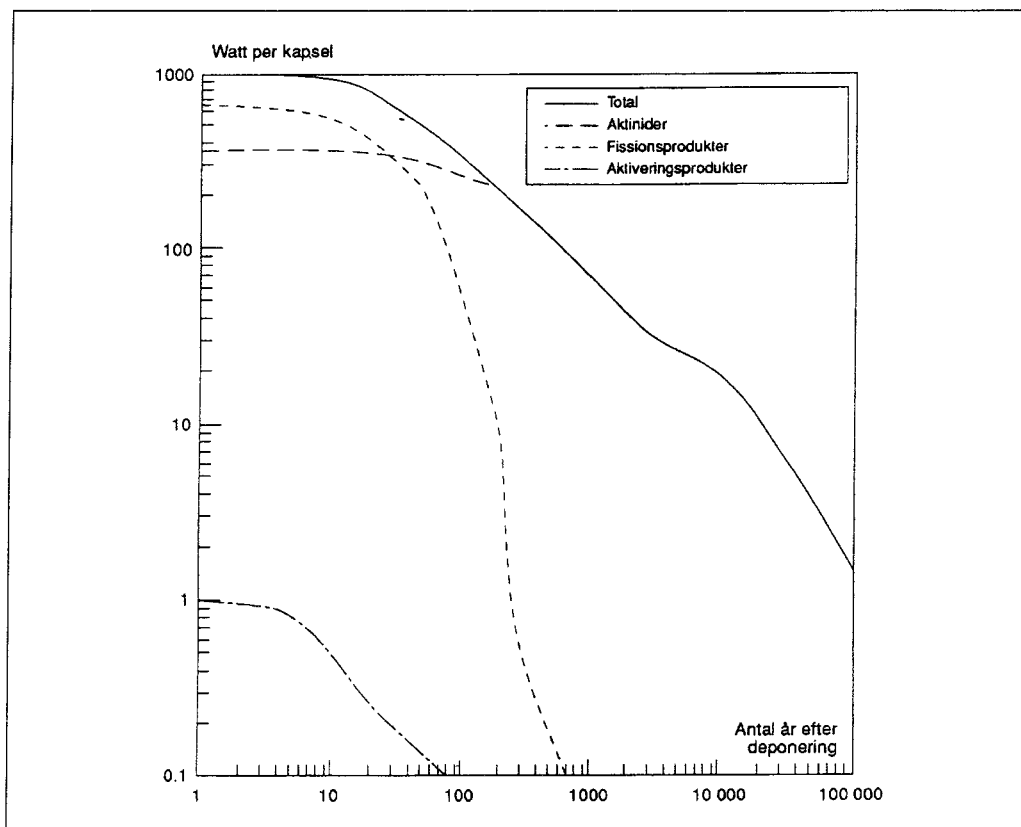
4.2.4 Radionuklidinventarium och resteffekt

Radionuklidinventarium och resteffekt för bränslet i förvaret beräknas med datorprogram. Typbränslets egenskaper, både vad gäller mängder, utbränningsgrader och material i inkapsling m m används som indata i beräkningarna.

Beräkningarna av radionuklidinventarium och resteffekt för typbränslet enligt ovan har gjorts med de etablerade datorprogrammen CASMO /4.2-4/ och ORIGEN2 /4.2-5/. Tvärsnittsdata från CASMO har använts som indata till ORIGEN2.

För beräkningen av aktiveringsprodukter har delar i bränsleelement och stavkapsling utförda i Zircaloy, rostfritt stål och Inconel/Incoloy inkluderats. Däremot har inte de boxar i Zircaloy som omger BWR-elementen tagits med. Detaljer kring beräkningarna finns redovisade i /4.2-3, 4.2-6/.

Figur 4.2-3 visar resteffektens avklingning.



Figur 4.2-3. Resteffekt i referenskapseln som funktion av tiden efter deponering.

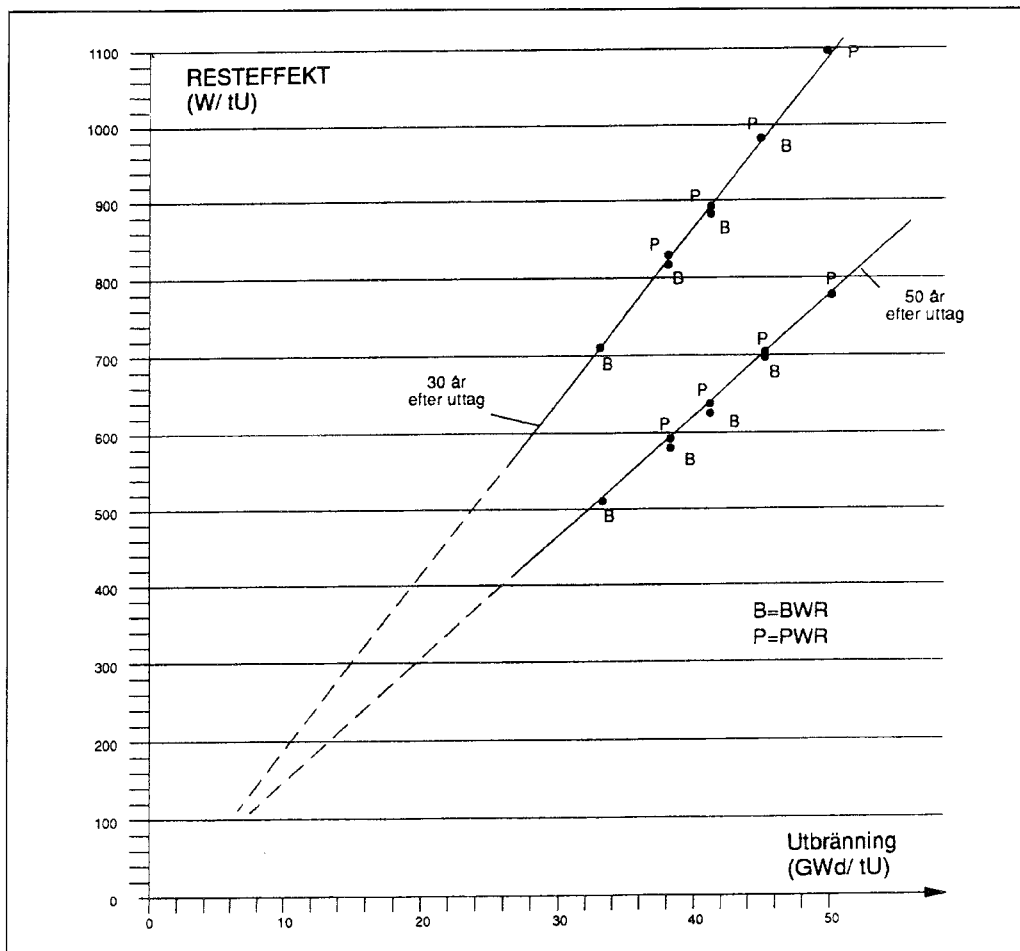
För en given energimängd producerad med lättvattenreaktorer är den totala resteffekten och det samlade fissionsproduktinventariet oberoende av utbränningsgrader.

Bränslets sammansättning och struktur kan dock påverkas av utbränningsgraden. Eftersom framtida utbränningar kan komma att skilja sig från den som antagits för typbränslet har beräkningar genomförts även för ett antal andra utbränningsgrader. Som framgår av figur 4.2-4, är resteffekten under de intressanta tidsperioderna i stort sett proportionell mot utbränningen. Detsamma gäller för radionuklidinnehållet.

Vid inplacering av bränsleelement i förvarskapslar eftersträvar man att få samma resteffekt i varje kapsel. Antalet element per kapsel är därför beroende på elementens resteffekt och därigenom på utbränningsgraden. Inventariet av fissionsprodukter är proportionellt mot utbränningen och blir därför i stort sett detsamma för en given resteffekt.

4.2.5 Urval av nuklider för säkerhetsanalysen

Vid deponeringstillfället innehåller använt kärnbränsle ett hundratal olika radionuklider /4.2-3/. Många av dessa har en försumbar betydelse för förvarets säkerhet. En metod för urval av radionuklider till en säkerhetsanalys presenteras nedan.



Figur 4.2-4. Bränsleelementens resteffekt som funktion av utbränning för två olika tidsperioder efter uttag ur reaktor.

Tre faktorer påverkar en radionuklids betydelse för säkerheten:

- mängden,
- nuklidens dosfaktor samt
- nuklidens rörligheten i förvarssystemet.

Dessa faktorer kan skilja många storleksordningar mellan olika nuklider. Mängden av en viss nuklid i förvaret vid en viss tidpunkt samt dess dosfaktor är relativt enkla att bestämma. Radionuklidens rörlighet är däremot mer komplicerad att beräkna, eftersom den är en kombination av många faktorer såsom upplösningssprocesser i bränslet samt diffusion och sorption i olika medier.

För urvalet delas nukliderna in i två grupper. Den ena består av aktinider och aktiniddöttrar; den andra av fissionsprodukter och aktiveringsprodukter med lätta kärnor. Anledningen till uppdelningen är att skillnaden i rörlighet mellan lättare och tyngre nuklider kan vara betydande medan skillnaderna inom en grupp är mer begränsad.

För fissions- och aktiveringsprodukterna beräknas den potentiella farligheten (dosfaktor \times mängd) för varje nuklid. Beräkningen görs från den antagna tidpunkten för förslutning av förvaret, dvs år 2050, och en miljon år framåt. Om farligheten för en viss nuklid vid någon tidpunkt överstiger 0,1 ‰ av alla fissions- och aktiveringsprodukternas totala farlighet vid samma tidpunkt inkluderas nukliden i analysen. Andelen 0,1 ‰ är vald för att täcka in skillnader i rörlighet. Den samlade effekten av de faktorer som bestämmer rörligheten bedöms inte skilja sig mer än en faktor 10^4 mellan olika lätta nuklider.

För aktinider och aktiniddöttrar inkluderas samtliga fyra sönderfallskedjor i analysen. Nukliden med högst massa i varje kedja bestäms med samma förfarande som för fissions- och aktiveringsprodukterna. Därefter inkluderas alla döttrar i kedjan (vissa endast i biosfären).

Denna urvalsmetod är tänkt att användas för använt bränsle, men bör också kunna tillämpas på andra avfallstyper.

Tabellerna 4.2-3 och 4.2-4 visar resultatet av tillämpningen av metoden på det radionuklidinventarium som beskrivs i avsnitt 4.2.4. Figur 4.2-5 visar den relativa potentiella farligheten för fissions/aktiveringsprodukter vid olika tider.

Vid korta tider dominerar Cs-137 den potentiella farligheten för inventariet. Nukliderna Co-60, Cd-113m och Eu-154 har kortare halveringstider och finns i mycket mindre mängder än Cs-137 redan vid deponeringen. De har heller inte någon nämnvärt högre rörlighet än Cs-137 och kan därför uteslutas ur analysen trots att de når över 0,1 ‰ av den totala potentiella farligheten vid de allra kortaste tiderna (~10 år).

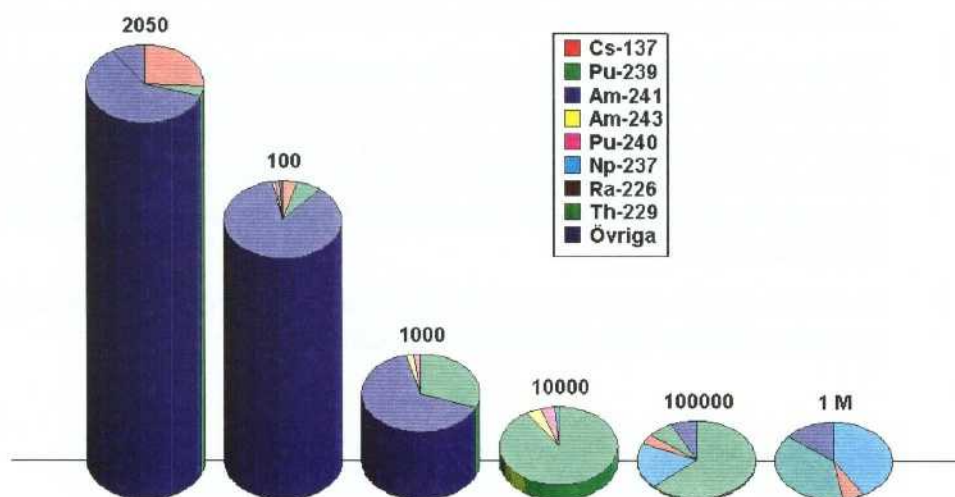
Kr-85 har också mycket kort halveringstid men kan ha betydelse i speciella scenarier eftersom den förekommer i gasform.

Tabell 4.2-3. Viktiga fissions- och aktiveringsprodukter

Nuklid	T ½ (år)	Nuklid	T ½ (år)
C-14	5730	Pd-107	6,5·10 ⁶
Cl-36	3·10 ⁵	Ag-108 m	127
Co-60	5,3	Cd-113 m	14,6
Ni-59	7,5·10 ⁴	Sn-126	1,0·10 ⁵
Ni-63	100	I-129	1,6·10 ⁷
Se-79	6,5·10 ⁴	Cs-135	2,0·10 ⁶
Kr-85	10,8	Cs-137	30,2
Sr-90	28,5	Sm-151	93
Zr-93	1,5·10 ⁶	Eu-154	8,8
Nb-94	2,0·10 ⁴	Ho-166 m	1 200
Tc-99	2,1·10 ⁵		

Tabell 4.2-4. Modernuklider och viktiga döttrar i de tunga nuklidernas sönderfallskedjor

Kedja	4N	4N+1	4N+2	4N+3
Moder	Cm-244	Cm-245	Cm-246/Am-242m	Cm-243/Am-243
Döttrar	Pu-240	Am-241	Pu-242/Cm-242	Pu-239
	U-236	Np-237	U-238/Pu-238	U-235
	Th-232	U-233	U-234	Pa-231
		Th-229	Th-230	
			Ra-226	



Figur 4.2-5. Bränslets relativa farlighet vid olika tider ges av cylindrarnas höjd. Dominerande nuklidens andel markeras på överytan.

4.3 ANNAT LÅNGLIVAT AVFALL

Långlivat låg- och medelaktivt avfall deponeras i en separat del av djupförvaret. Mängderna är jämförelsevis små och den huvudsakliga källan är forskning och förbrukade delar från reaktorerna som har suttit i eller nära bränslehärden, dvs härdkomponenter och interna reaktordelar. Härdkomponenter mellanlagras på CLAB och forskningsavfallet lagras och behandlas på Studsvik.

Detta avfall kommer att deponeras i tre specifikt utformade delar av djupförvaret, se avsnitt 5.2. Den totala volymen avfall beräknas uppgå till ca 25 000 m³ (summan av avfallsförpackningarnas yttervolym). I strikt mening är det endast en del av avfallet som hör till kategorin långlivat avfall. Därutöver ingår bl a driftavfall och rivningsavfall från CLAB och in kapslingsanläggningen. Den del av avfallet som även skulle kunna accepteras av SFR utgör ca 50 % av totala volymen.

En sammanställning av mängder, sammansättning och egenskaper hos detta avfall har nyligen gjorts /4.3-1/. Ambitionen har varit att göra en så god uppskattning som möjligt på befintligt underlag. Tillgänglig information har använts men även beräkningar och konsultationer med avfallsproducenterna. Bättre uppgifter om avfallets sammansättning och innehåll erhålles successivt, i och med att sk typbeskrivningar produceras enligt samma praxis som för avfallet till SFR.

Den framtagna rapporten om avfallet har använts som underlag till en första bedömning av förvarets barriärfunktioner /4.3-2/.

Urval av nuklider för säkerhetsanalysen

Tidplanerna för utformning och analys av annat långlivat avfall baseras på att en redovisning ska göras inför tillståndsansökan för djupförvaret, dvs kring år 2001. I SR 95 diskuteras därför inte säkerhetsanalysen av annat långlivat avfall.

4.4 ÖVRIGT TOXISKT AVFALL

Översiktliga inventeringar av kemiskt giftiga ämnen har gjorts för såväl kapslar med använt bränsle /4.4-1/ som för annat långlivat avfall /4.3-1/. I använt bränsle finns uran, men dessutom mindre mängder av andra grundämnen som kärnreaktionerna producerat. Flera av de här kemiska elementen kan sägas vara giftiga eller skadliga för miljön, även om man bortser från radioaktiviteten. Exempel på sådana ämnen är silver, barium, kadmium, antimon och selen. Skadliga metaller som krom och nickel finns i metalldelarna i bränsleelementen och även kapselmaterialet koppar kan sägas ha en viss giftighet.

Riktvärden som anges för högsta tillåtna halt av ett ämne i dricksvatten har använts som mått på giftigheten /4.4-1, 4.3-1/. Uran är i det här avseendet den dominerande komponenten, dels eftersom det finns jämförelsevis mycket uran i en kapsel, dels för att det är ett relativt giftigt grundämne.

Även i långlivat låg- och medelaktivt avfall finns metaller som är kemiskt giftiga. Här förekommer också en mindre del organiska ämnen som kan vara skadliga för miljön och hälsan. Exempelvis finns stora mängder krom och nickel i de interna reaktordelarna av rostfritt stål som ska deponeras. Andra metaller som finns i avfallet är bly, koppar, kadmium och beryllium. Bly ingår som strål-

skärm i en del av förpackningarna. De uppskattningar av mängder som har gjorts är preliminära.

Förvaret skyddar även omgivningen från de kemiskt giftiga ämnen som ingår i avfallet /4.4-2, 4.3-2/.

5 FÖRVARSSYSTEMETS UPPBYGGNAD

Kapitel 5 redovisar förvarssystemets och de tekniska barriärernas utformning. Materialet baseras på det underlag som i aktuellt projekteringskede ligger till grund för den säkerhetsanalys som redovisas. Kapitlet presenterar djupförvarets utformning och material, kvalitetskrav/föroreningar och dimensioner för de barriärer som ingår i förvarssystemet. Likaså redovisas metoder för byggande och kontroll som kan komma att utnyttjas och de eventuella effekter dessa kan ha på kringliggande berg. Funktionsstudier eller tidigare säkerhetsanalyser som legat till grund för val av dimensionering eller utformning refereras. "Fria" paramerar som kan utnyttjas för platsanpassning eller optimering redovisas separat.

Mot bakgrund av de viktigare säkerhetsfunktionerna för olika barriärer görs en genomgång av principerna för förvarets uppbyggnad varefter underjordsanläggningens olika delar och deras utformning/layout presenteras. Sedan presenteras utförandet av deponeringspositioner och utförande/utformning av kapsel, bentonitbuffert och tunnelåterfyllning. Pluggning av tunnlar och schakt samt förvarets slutliga försegling diskuteras.

I denna rapport redovisas i kapitel 5 den nu (september 1995) aktuella utformningen av djupförvarets underjordsdel. Beskrivningen illustrerar hur materialet kommer att struktureras. Detaljer i utformningen kan förändras under utvecklingsarbetet och med valet av arbetsmetoder. Pluggning av tunnlar och schakt har inte diskuterats.

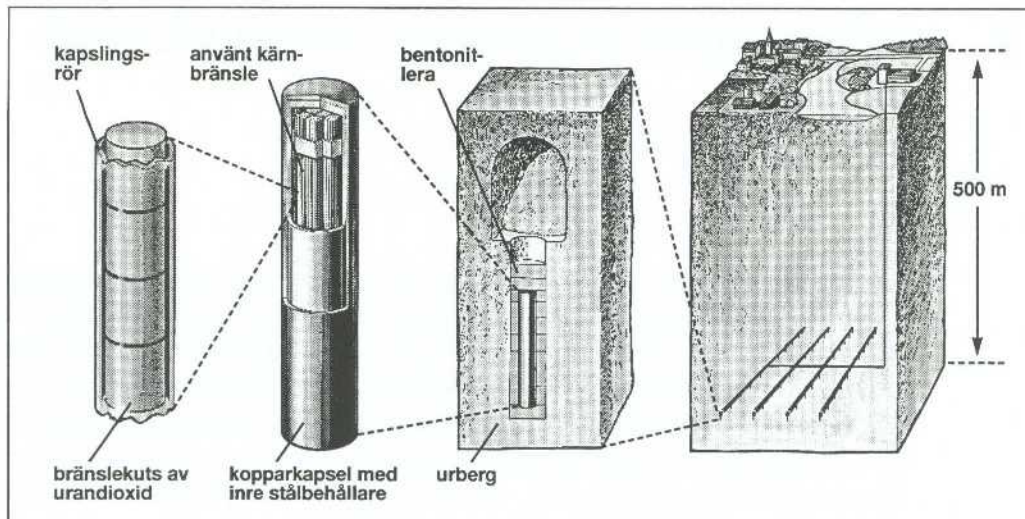
5.1 INLEDNING

Uppbyggnaden av djupförvaret är baserad på KBS-3 konceptet. Förvaret består av två huvuddelar på c:a 500 m djup i det svenska urberget.

Den ena huvuddelen är ett förvar för det använda högaktiva kärnbränslet, se figur 5.1-1. Detta avfall innesluts i kapslar. Kapslarna består av en insats av stål som ger mekanisk stabilitet samt ett hölje av koppar som ger korrosionsskydd. Kapslarna deponeras en och en i uppborrade deponeringshål i botten av ett tunnelsystem. Varje kapsel omges med ett lager av bentonitlera. Leran håller kapslarna på plats och isolerar dem från grundvattnet i det omgivande berget. Leran fördröjer också transporten av olika ämnen till och från kapseln.

Den andra huvuddelen är ett förvar för andra typer av långlivat avfall som deponeras i utsprängda bergutrymmen. Fysiska och kemiska barriärer av betong och bentonit begränsar vattentransporten av det toxiska materialet. Denna förvarsdel liknar det befintliga slutförvaret för radioaktivt driftavfall, SFR.

Efter att avfallet deponerats återfylls tunnlar och andra utrymmen.



Figur 5.1-1. Förvardsdelen för högaktivt avfall.

I detta kapitel beskrivs först förvarssystemets layout med tonvikt på de viktigaste underjordiska delarna. Därefter behandlas mer i detalj kapseln samt bentonitbuffert och återfyllnadsmaterial. Presentationen utgår från de krav man ställt på olika delar i systemet och visar vilken utformning kraven lett fram till. Funktionsanalyser av olika delsystem diskuteras i kapitel 10 och 11.

5.2 FÖRVARSSYSTEMETS UTFORMNING OCH LAYOUT

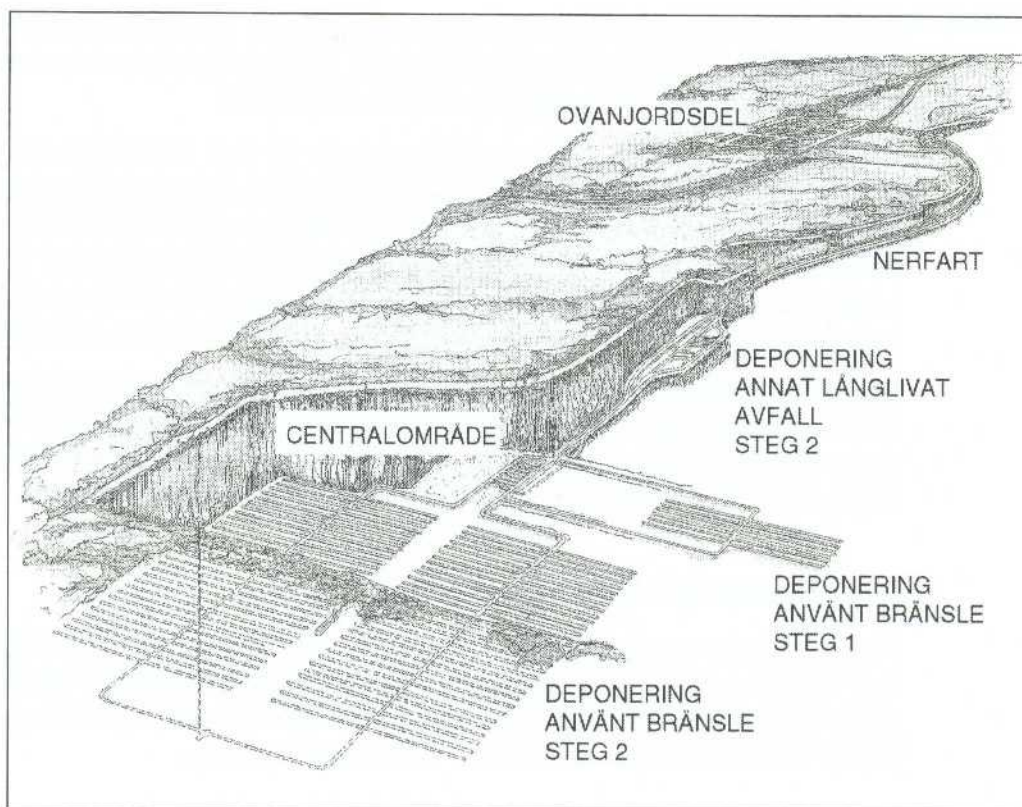
Utformning och layout av bergrum, tunnlar, deponeringspositioner m m i förvarssystemet bygger på den som presenterades i KBS 3 rapporten.

Flera alternativa lösningar för hela djupförvarssystemet placerat på "gruvdjup", dvs mellan 400 och 700 m under markytan, har studerats tidigare /5.2-1, 2/. KBS-3-modellen har i dessa jämförelser bedömts vara den mest ändamålsenliga. Denna utformning ligger därför till grund för det pågående arbetet med förvarsdesignen.

Genom det löpande utvecklingsarbetet förändras detaljer i utformningen och val av arbetsmetoder. De modifierade lösningarna uppfyller dock alltid lägst samma funktionskrav som tidigare designer. Beskrivningen nedan utgår från aktuell utformning nu (september 1995).

En skiss av djupförvarets olika delar framgår av Figur 5.2-1 och består av

- ovanjordsdel,
- nedfart (schakt eller ramp),
- centralområde under jord,
- område för deponering av använt kärnbränsle, steg 1,
- område för deponering av använt kärnbränsle, steg 2 samt
- område för deponering av annat långlivat avfall.



Figur 5.2-1. Skiss av djupförvaret med rampnedfart.

Djupförvaret för det använda kärnbränslet enligt KBS-3 placeras i ett eller två plan på ca 500 m djup /5.2-2, 3/. Området för annat långlivat avfall utformas enligt principerna för slutförvaret för radioaktivt driftavfall (SFR) /5.2-4/. Det förläggs på ett sådant avstånd till förvaret för det använda kärnbränslet att de stora mängderna betong i enheterna för annat långlivat avfall inte stör de kemiska förhållandena i området för det använda kärnbränslet.

I det följande beskrivs mer detaljerat de delar av förvaret som är av störst intresse för förvarets säkerhet, nämligen de underjordiska delarna avsedda för använt kärnbränsle respektive för annat långlivat avfall.

5.2.1 Del för använt kärnbränsle

Allmänt

Förvaret för det använda kärnbränslet består av parallella deponeringstunnlar med hål borrarade i botten. I hålen placeras kapslar med det använda kärnbränslet tillsammans med en omgivande lerbuffert.

En sektion genom en sådan kapselposition framgår av figur 5.2-2. Måtten bestäms av kapselns storlek, erforderligt utrymme för bergarbeten, drift och deponering samt av önskad funktion och säkerhet efter förslutning /5.2-5/. I praktiken kommer vissa avvikelser från de angivna måtten att fås. De påverkas genom val av t.ex. bergbrytningsmetoder. Snävare toleranser kan inom måttliga gränser åstadkommas till priset av mer komplex och kostnadskrävande teknik.

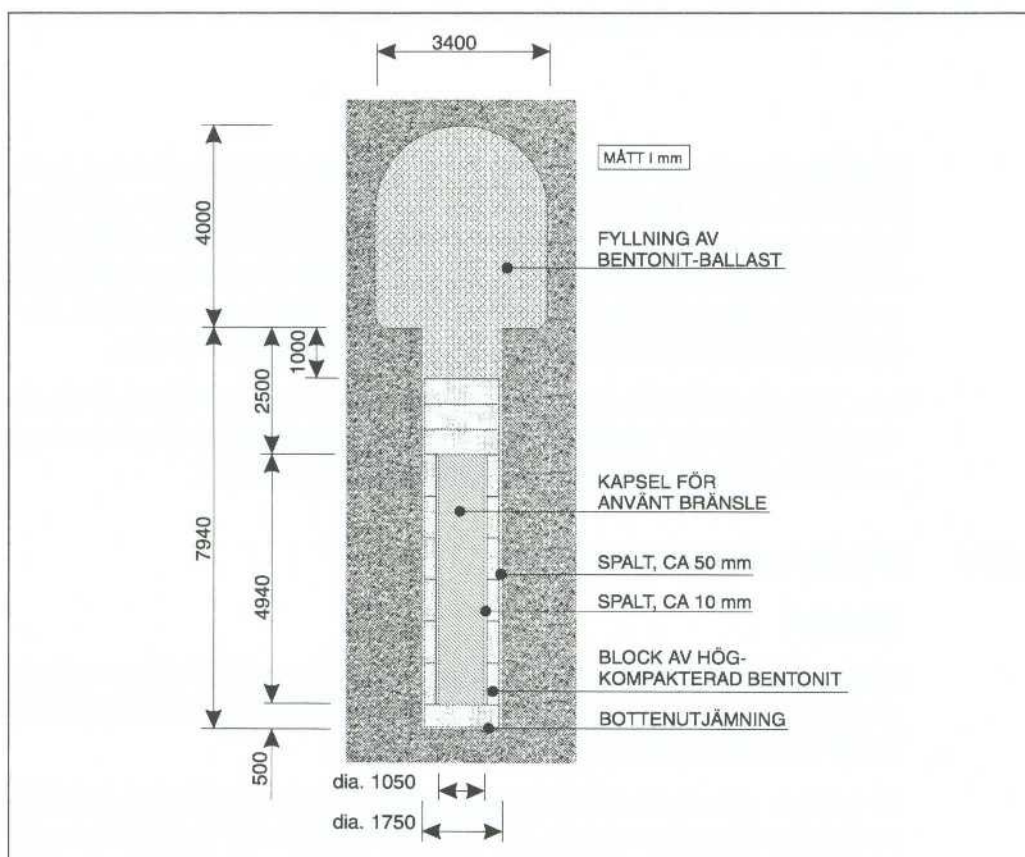
Deponeringstunnlarna binds samman av tunnlar för transport, kommunikation, ventilation och ledningsdragning Dessa har förbindelse med ett centralområde under jord och med kommunikationen med markytan.

Resteffekten i det deponerade avfallet kommer att leda till en uppvärmning av förvaret. Placeringen av deponeringstunnlarna liksom det inbördes avståndet mellan kapslar i dessa bestäms med hänsyn till kravet på begränsning av temperaturen i lerbufferten. Placeringen kommer därför att påverkas av det lokala bergets termiska egenskaper /5.2-6/. Lokala förhållanden bestämmer slutgiltigt hur stor del av det maximala antalet kapselpositioner som kan utnyttjas.

Utformningen bygger på att alla tunnlar borras eller sprängs med konventionell teknik samt att deponeringshålen fullprofilborras. Kapslarna "vickas" ner i deponeringshålet så att höjden i deponeringstunneln kan vara lägre än kapselns längd. Dessa förutsättningar har inte ändrats sedan SKB 91 /5.2-7/.

Dimensioner på deponeringstunnel

Utrymmesbehovet för att föra ner kapseln i deponeringshålet sätter **tunnelhöjden till 4,0 m**. Deponeringsmaskinen kräver en **tunnelbredd av 3,4 m**. Måtten gäller för den givna kapseln och den ansatta diametern på deponeringshålet. Vidare förutsätts enbart friblåsande ventilation i tunneln.



Figur 5.2-2. Sektion av deponeringshål.

Dimensioner på deponeringshål

Dimensionerande för *avståndet mellan tunnelns botten och kapselns överdel* är

- placering av kapsel utanför sprängstörd zon,
- hänsyn till spänningsomlagrade zonens betydelse,
- hänsyn till bentonitens svällning beroende på återfyllnadsmaterial i tunneln,
- hänsyn till påverkan på bentoniten från ev betong på tunnelns botten,
- hänsyn till ev injektering i berget under tunneln,
- hänsyn till ev bultning för räls på tunnelns botten,
- motstånd mot radionuklidtransport samt
- strålskydd som tillåter vistelse i tunneln.

Kravet att kapseln placeras utanför den sprängstörda zonen sätter **avståndet till 2,5 m**. För att uppnå låg hydraulisk konduktivitet runt kapseln samt dessutom en inte alltför stor täthetsminskning i bufferten i övre delen av hålet sätts **bentonitåterfyllningen över kapseln till 1,5 m**. **Däröver används bentonit/ballast i 1,0 m**.

Dimensionerande för *tjockleken på bufferten under kapseln* är

- bottenutjämnings påverkan på bentoniten om betong används,
- bentonitens bärighet,
- bentonitens svällförmåga,
- bottenplattans hydrauliska konduktivitet,
- bottenplattans motstånd mot nuklidtransport samt
- värmetransport genom bottenplattan.

Med hänsyn till att utjämnings av botten ska kunna ske med betong och att barriären mot nuklidtransport ska ha minst samma kapacitet som i övriga delar av bufferten sätts **tjockleken på bufferten under kapseln till 0,5 m**.

Hålets diameter är summan av kapselns och buffertens diametrar. Bentonitbuffertens tjocklek bestäms i sin tur av önskad mekanisk, kemisk och hydraulisk funktion samt önskad kapacitet för gasmigration.

Tillåten värmeutveckling i kapseln begränsas av den temperaturhöjning som kan tolereras i bufferten. En mäktigare buffert kommer alltså att leda till att mindre använt bränsle kan lastas i varje kapsel, vilket påverkar kostnaderna. Med hänsyn till detta såväl som till kravet på god barriärkapacitet mot nuklidtransporter görs **bentonitbarriären 0,35 m tjock** vilket leder till en håldiameter **på 1,75 m** för den förutsatta (avsnitt 5.3) kapselstorleken.

Avstånd mellan kapslar och mellan deponeringstunnlar

Dimensionerande för avståndet mellan deponeringshål är

- mängd bränsle per kapsel,
- buffertens tjocklek,
- tillåten temperaturstegring i bufferten,
- bergets ursprungliga temperatur,
- buffertens termiska diffusivitet (förmåga att leda bort värme),
- bergets termiska diffusivitet,
- avstånd mellan deponeringstunnlar,
- tillåten termisk last per horisontell ytenhet,
- bergets hållfasthet mot termiskt inducerade spänningar samt
- krav på begränsad hydraulisk förbindelse mellan deponeringshål.

Den dimensionerande faktorn /5.2-8/ är temperaturstegringen i bentonitbufferten. För den givna kapseln, termiska data för vanlig granit, 18°C *in situ* i berget samt 80°C maximal temperatur i bentoniten blir **kapselavståndet 6,0 m och tunnelavståndet 40 m**. Detta är en ekonomisk optimering mellan kapselavstånd och tunnelavstånd. Låg ursprunglig temperatur, tillåten högre temperatur i bentoniten och högre kvartshalt än normalt är exempel på några faktorer som leder till mindre avstånd mellan kapslar och/eller mellan tunnlar.

Deponeringspositioner

Det är dock inte sannolikt att alla positionerna i detta ovan givna mönster kan utnyttjas. Olika lokala egenskaper i berggrunden kan exempelvis göra att förhållandena för trygg isolering av avfallet på lång sikt blir dåliga i vissa positioner.

De faktorer som identifierats ha betydelse för om en kapselposition ska utnyttjas eller inte är /5.2-9/

- litologi (bergmassans sammansättning),
- inflöde av vatten till deponeringshålet,
- stabilitet ur konstruktionssynpunkt,
- långtidsstabilitet samt
- bergets termiska egenskaper.

Dessa faktorer kan studeras i såväl regional skala som för enskilda kapselpositioner. För respektive faktor kan ett spann på acceptabla värden bestämmas.

Genom att bedöma och gränssätta dessa faktorer och sedan applicera dem på förvarsplatsen kommer man fram till en utnyttjandegrad av bergvolymen. Tills vidare antas att 90 procent av alla positioner kan utnyttjas för deponering.

5.2.2 Del för annat långlivat avfall

Allmänt

Förvaret för annat långlivat avfall består av parallellt liggande bergrum som i SFR. Tunnlarna fram till bergrummen utnyttjas för deponering av rivningsavfall. Området placeras med hänsyn till nödvändigt avstånd från förvaret för använt kärnbränsle och på ett sätt som är praktiskt ur layout- och transportsynpunkt.

Förvarsdelen för annat långlivat avfall består i sin tur av tre delar som skiljer sig genom den typ av avfall som ska deponeras:

1. Driftavfall från centrallagret för använt bränsle (CLAB), Inkapslingsanläggningen och Studsvik.
2. Härdkomponenter och reaktorernas interna delar.
3. Rivningsavfall från CLAB och Inkapslingsanläggningen.

Allt material är inneslutet i betongkokiller eller i plåtfat som är jämförbara med de kollin som idag deponeras i SFR. Förvaret utformas också likt SFR.

I respektive bergrum, se nedan, byggs olika barriärer runt de deponerade kollina. Hänsyn tas till den isolerande funktion som önskas efter förslutning och den grad av återfyllning och pluggning som bedöms nödvändig /5.2-4/.

Förutsättningar och material för återfyllning diskuteras närmare i avsnitt 5.4.

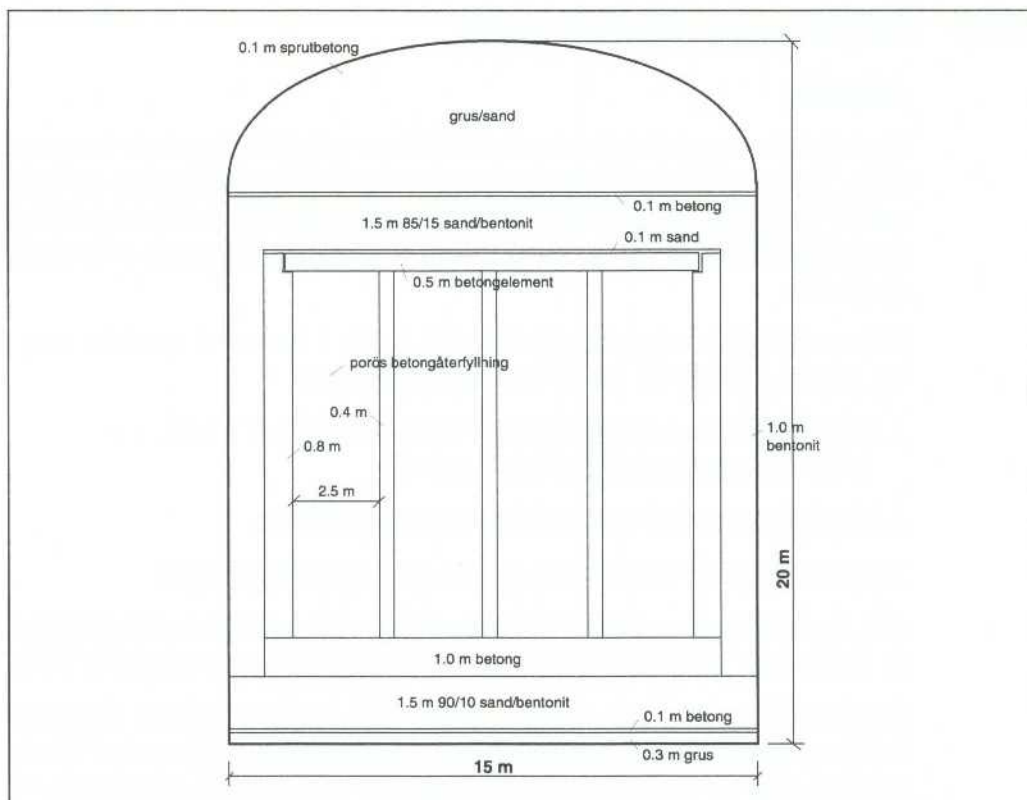
Del för driftavfall från CLAB, Inkapslingsstation och Studsvik

Bergrummets utformning liknar den silo som idag finns i SFR. Väggar och tak täcks med sprutbetong. Betongkonstruktionen med fack för avfallskollina vilar på en bottenplatta av kompakterad bentonit och bergballast. Denna vilar i sin tur på ett dränagelager och en avjämning av betong, se figur 5.2-3. Utrymmena mellan avfallskollina och betongväggarna i facken fylls ut med en porös betong. Ovanpå läggs ett betonglock. Utrymmet mellan bergväggen och den yttre betongväggen fylls med bentonit upp till betonglockets nivå, varefter hela rummet täcks av ett lager av bergkross och ett lager av bentonit och bergballast. Ovanpå detta läggs betongplattor och bergrummet fylls upp till taket med bergkross.

Tunneln in till bergrummet tätas med plugg som sluter an mot en frilagd bergvägg. Detta kan ske med en blandning av bentonit och bergballast respektive ren bentonit på samma sätt som i deponeringstunnlar, se avsnitt 5.4. Den störda zonen åtgärdas inte.

Del för härdkomponenter och reaktorernas interna delar

Bergrummets utformning liknar det betongtankförvar som finns i SFR. Väggar och tak betongsprutas. Golvet täcks av ett dränerande lager på vilket betongkonstruktionens golv, yttre väggar och mellanväggar vila, se figur 5.2-4. När samtliga kokiller placerats läggs ett lock av betongplattor på och resterande volymer utanför betongkonstruktionen återfylls med bergkross. Utrymmena



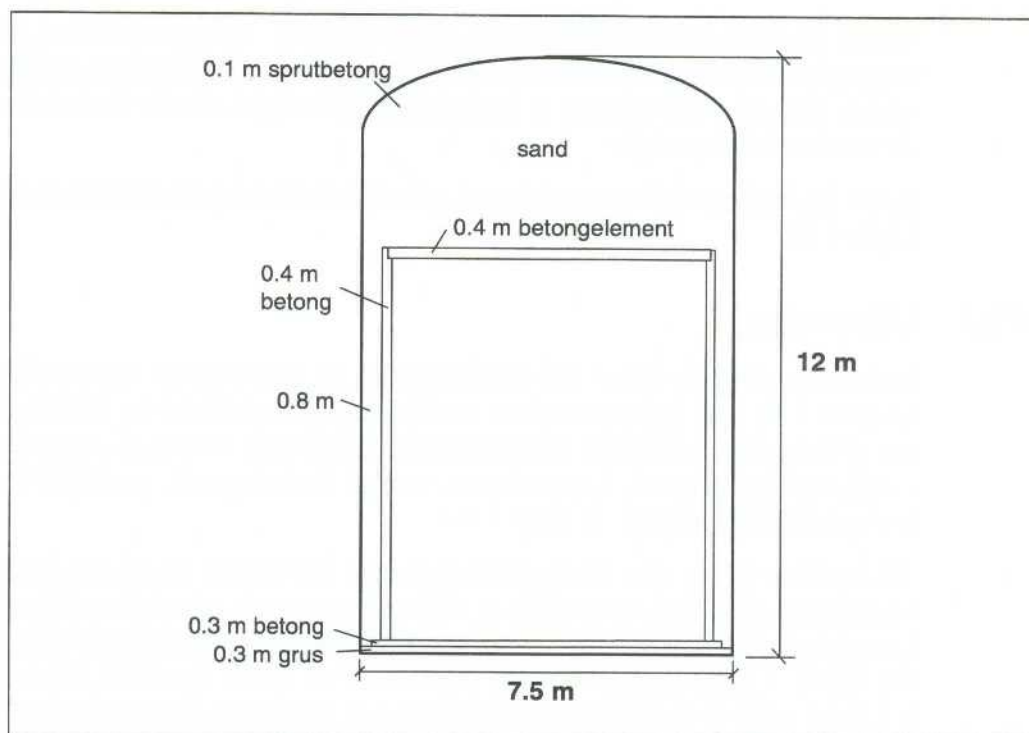
Figur 5.2-3. Sektion av bergrum för driftavfall från CLAB, Inkapslingsstation och Studsvik.

mellan kokillerna och mellan kokiller och betongvägg inne i betongkonstruktionen återfylls inte.

Tunneln från transporttunnel in till bergrummet återfylls med en blandning av bentonit och bergballast. Pluggar mot eventuellt förekommande vattenförande diskontinuiteter byggs i mån av behov, så att transportvägar för nuklider bestäms av bergets struktur och inte av förekomsten av tunnlar och bergrum.

Del för rivningsavfall

Denna del består av tunnelsystemet fram till bergrummen inom området för annat långlivat avfall. Väggar och tak betongsprutas. Ett betonggolv gjuts på ett dränerande bottenlager. Rivningsavfallet är inneslutet i plåtcontainrar. Alla tomma utrymmen mellan containrar och mellan containrar och bergvägg återfylls med bergkross. Tunnelsystemet pluggas slutligen genom återfyllning av bentonit och bergkross, så att tätning erhålls mot bergväggarna. I den mån sprutbetong behövs i den sektionen i bergförstärkande syfte rensas bergväggen så att god kontakt skapas.



Figur 5.2-4. Sektion av bergrum för hårdkomponenter och interna reaktordelar.

5.3 KAPSEL

5.3.1 Inledning

Kapseln är en fundamental teknisk barriär i förvarssystemet. Den ska uppfylla två primära funktionskrav för att ge erforderlig isoleringen i djupförvaret:

1. Kapseln ska vara tät under lång tid, vilket ställer krav på
 - initial täthet,
 - korrosionsbeständighet samt
 - hållfasthet.
2. Kapseln 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.

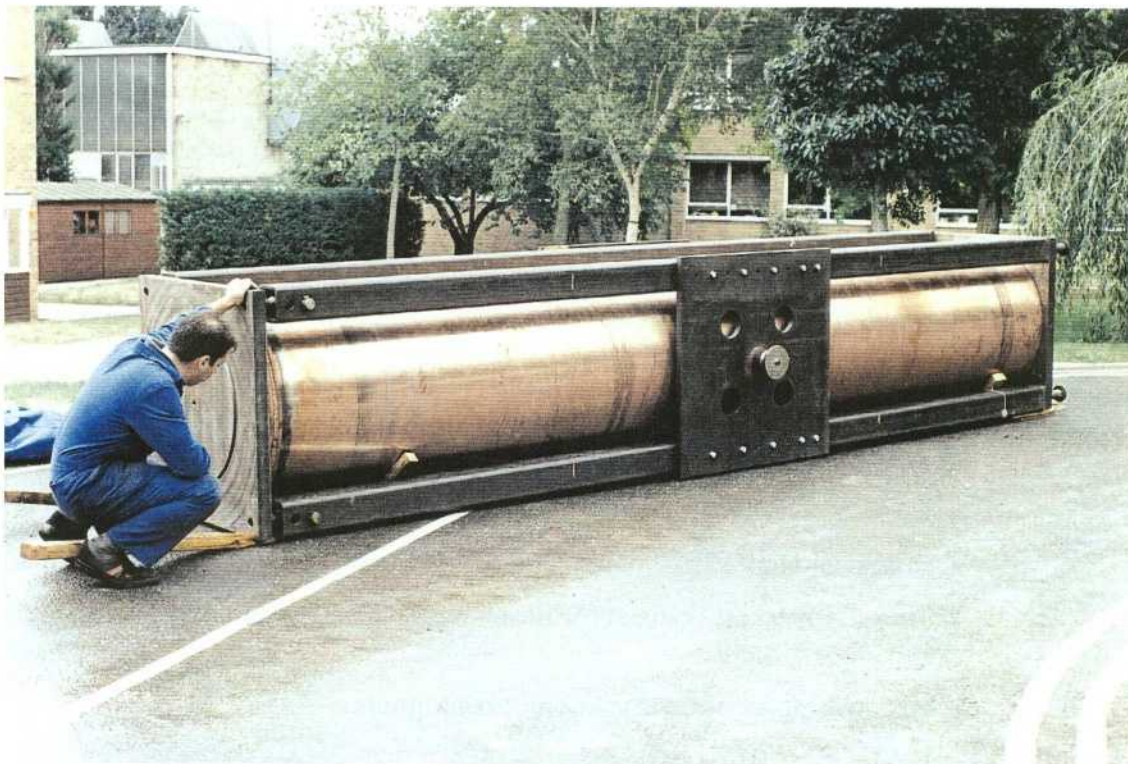
Nedan beskrivs kapselns dimensioner och material. Viktiga metoder i tillverkningen beskrivs kortfattat liksom den kvalitetskontroll tillverkningen ska underkastas. Kapselns utformning är inte slutgiltigt fastlagd, därför diskuteras kort alternativa utformningar.

Kapselns funktion i förvarssystemet, givet förutsättningarna nedan, analyseras i kapitel 10.

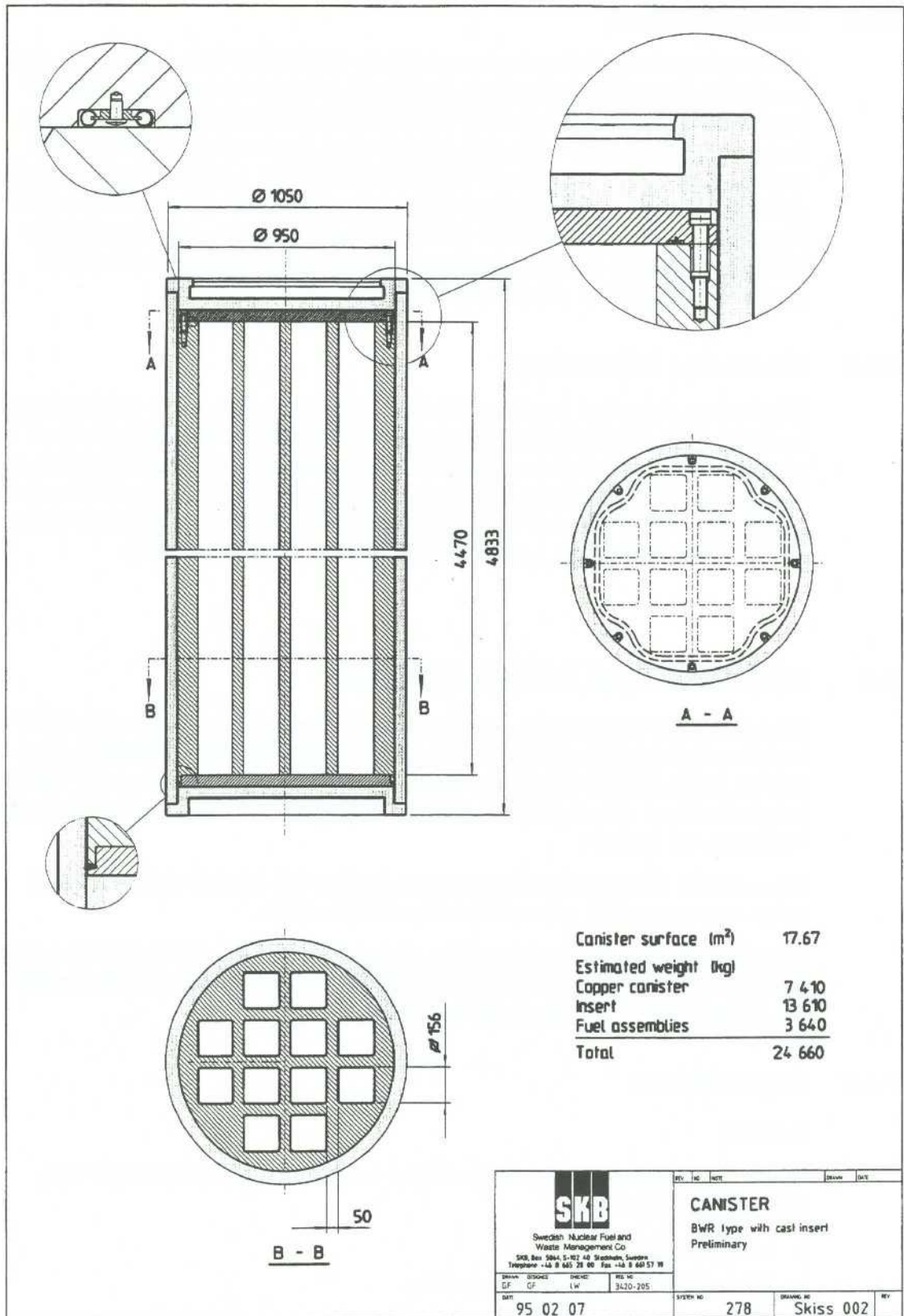
5.3.2 Utformning

Referenskapseln består av två komponenter; en gjuten insats samt ett kopparhölje /5.3-1/. Den gjutna insatsen, med individuella kanaler för bränsleelementen ger kapseln mekaniska hållfasthet att motstå yttre övertryck i djupförvaret och hanteringslasterna. Kopparhöljet, som är 50 mm tjockt, ger kapseln dess korrosionsbeständighet, se figur 5.3-1.

Alla detaljer kring utformningen är ännu inte fastställda, utan kan komma att modifieras efter krav, som ställs av tillverkningen och inkapslingsprocessen. En möjlig utformning visas i figur 5.3-2. Denna utformning ligger till grund för SR 95. I detta alternativ består kapseln av en insats i gjutstål, tillverkad i två delar vardera med halva total längden och sammansvetsade på mitten. Det yttre kopparhöljet kan tillverkas antingen som ett sömlöst rör genom extrudering eller från två plåtar, som formats till rörhalvor och svetsats samman med två längsgående elektronstrålesvetsar. Lock och botten kan tillverkas genom bearbetning från tjock plåt eller smidas och bearbetas till slutlig form. Den totala vikten för fylld kapsel blir med detta utförande cirka 24,5 ton. Insatsen står för cirka 13,5 ton och kopparhöljet för 7,5 ton.



Figur 5.3-1. Kapselns kopparhölje



Figur 5.3-2. En möjlig utformning av kapselns hölje och insats.

5.3.3 Kvalitetskontroll

Tillverkningen och förslutningen av kapseln kommer att kontrolleras och verifieras med oförstörande provning. Detaljerna kring provningsprogrammet är inte fastställda. Utgångsmaterialet förutsätts provas med ultraljud och svetsar med en kombination av radiografi och ultraljud. Svetsarna kontrolleras även med metoder för att fastställa att kopparhöljet inte har mindre ytbrytande defekter. Sådana skulle sakna betydelse för kapseln mekaniska integritet, men skulle kunna tjäna som anvisningar för spaltkorrosion. På samma sätt förutsätts förslutningssvetsen på locket kontrolleras med radiografi, ultraljud och någon metod för att detektera ytbrytande sprickor.

5.3.4 Alternativa utformningar

Eftersom ett slutgiltigt kapselval ännu inte gjorts kan alternativa utformningar komma i fråga. Gemensamt för dessa utformningar är att korrosionbärräerna utgörs av koppar och att den mekaniska hållfastheten ges av en inre tryckbärande komponent. För den inre komponenten kan alternativa utformningar och material komma ifråga. De mest aktuella för gjutna alternativ är segjärn och brons. Som alternativ till gjuten insats har självbärande stålrör undersökts.

5.4 BUFFERT OCH ÅTERFYLLNING

De deponerade kapslarna kommer att omges av en buffert som bl a ska hålla kapseln på plats, isolera kapseln från grundvatten samt kraftigt fördröja transport av radionuklider. Vidare ska tunnlar, bergrum och schakt i förvaret återfyllas på ett sådant sätt att grundvattenflöde förhindras och kemiska förändringar försvåras och fördröjs.

Dessa delvis likartade funktionskrav hos buffert och återfyllnad leder till att också övervägandena vid materialvalen blir likartade.

I det följande beskrivs funktionskrav, materialval och teknik för applicering för buffert och återfyllnad. I kapitel 10 presenteras en funktionsanalys för bufferten, baserat på de förutsättningar som beskrivs nedan.

5.4.1 Funktionskrav

Buffert

Val av buffertmaterial och utformning av bufferten runt kapseln utgår från kraven att bufferten ska

- bära kapseln,
- förhindra strömning av grundvatten,
- tillåta vätgas att komma ut,
- leda bort värme från bränslet,
- finnas kvar under lång tid,
- motstå kemisk omvandling under lång tid samt
- filtrera kolloider.

Dessutom finns kravet att bufferten inte får äventyra kapsels och bergs möjligheter att uppfylla sina funktionskrav. Vidare finns det ekonomiska kravet att tillgången på den materialtyp som ska användas ska vara god.

Olika typer av svällande leror med hög smektithalt har goda förutsättningar att väl uppfylla de ställda såväl tekniska som ekonomiska kraven. Med ett sådant materialval uppnår man samtidigt en rad andra förmånliga egenskaper såsom

- begränsning av transport av korrodanter fram till kapselns yta (diffusionstransport),
- sorption av radionuklider,
- filtrering av mikroorganismer samt
- stabilisering av deponeringshålets väggar.

De olika funktionerna styrs av en rad mätbara egenskaper hos bufferten:

- hydrauliska konduktivitet,
- svälltryck,
- svällförmåga,
- skjuvhållfasthet,
- reologiska egenskaperna,
- porvolym,
- diffusions- och sorptionsegenskaper samt
- termisk ledningsförmåga.

Återfyllning

Buffertmaterial i olika blandningar med bentonit och bergballast är tänkt att användas vid återfyllning av tunnlar, bergrum och schakt. Nödvändig funktion hos dessa material är att de ska

- motverka utsvällning av bentonit i deponeringshål,
- begränsa strömning av vatten i deponeringstunnel samt
- motstå kemisk omvandling under lång tid.

I de fall vattentransporten till närberget är begränsad blir kravet på låg hydraulisk konduktivitet i tunneln betydelselöst. I dessa fall blir kravet på mekanisk stabilitet det viktigaste.

Det ekonomiska kravet är att söka den billigaste blandningen som klarar funktionskraven. Detta krav har betydelse vid val av material genom att ren bentonit är dyr och funktionskraven kan uppfyllas med magra bentonitblandningar. Ställs krav på enbart mekanisk stabilitet kan oblandad ballast övervägas.

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 hurutsvällningen från deponeringshålen begränsas.

5.4.2 Materialval

Buffert

Ett lämpligt buffertmaterial är en smektithaltig lera. Dessa lerors svällande funktion skulle dock på sikt kunna äventyras av omvandling av smektit till illit. En studie av olika buffertmaterial /5.4-1/ har visat att ursprungshalten av smektit bör vara minst 50 procent för att buffertens funktion ska kunna garanteras. Studien bygger på en modell för degradering av lera i form av omvandling av smektit till illit /5.4-2, 3/. Studien visar att endast smektittyperna montmorillonit och saponit med natrium som huvudsaklig adsorberad jon bör komma ifråga. Sådana leror, bentoniter, finns tillgängliga i riklig mängd i ett stort antal länder.

Ännu högre ursprungliga smektithalter är mycket värdefullt för att ge effektiv självläkning och homogenisering av leran. Bentoniter med en halt av montmorillonit av 70-90 procent och med natrium som dominerande adsorberad katjon, finns kommersiellt tillgängliga i USA, Grekland och Italien.

Halten av svavelmineral och organiska ämnen bör, oavsett smektithalt, vara liten.

Återfyllning

Det preliminära valet av material för återfyllning är blandningar av 10–20 procent bentonit och resten ballast som läggs ut och kompakteras på platsen. Efter vattenmättnad får återfyllningen en hydraulisk konduktivitet på mindre än 10^{-9} m/s, vilket är i nivå med den hos mycket tätt berg. Av miljömässiga och ekonomiska skäl förordas användning av det berg som bryts i djupförvaret, vilket krossas till lämplig kornstorlek. Egenskaperna hos sådant material har visats vara jämförbara med egenskaperna hos kvartssand som ballast /5.4-4/.

Alternativa återfyllningsmaterial är bergballast eller morän utan bentonit men deras hydrauliska konduktivitet kommer efter kompaktering att var högre än den för hydrauliskt täta berg /5.4-5/.

5.4.3 Teknik för applicering

Buffert

Förkompakterade magnumblock appliceras som segment eller hela ringar med full diameter. Dessa pressas till hög vattenmättnadsgrad. Efter deponering av kapsel fylls spalterna med vatten med låg elektrolythalt så att ett högt porvattentryck uppnås snabbt.

Återfyllning

Återfyllningsmaterialet läggs ut i horisontella skikt och kompakteras med vibrovält respektive i lutande skikt överst mot taket där kompaktering sker med vibrerande platta som monerats på en rörlig arm eller liknande utrustning.

Pressning av block med en vikt på ca 20 kg har gjorts med gott resultat /5.4-6/. Sådana block kan eventuellt användas i övre delen av tunneln mot taket.

6 FÖRVARSPLOTSSENS EGENSKAPER

I kapitlet redovisas de geovetenskapliga egenskaper hos den valda förvarsplatsen som är av potentiell betydelse för den långsiktiga säkerheten hos ett djupförvar i kristallint berg.

Utifrån platsdata och geovetenskaplig förståelse skapas en platsmodell som utgör en redovisning av platsens strukturella egenskaper med avseende på långsiktig säkerhet. Denna kan sägas utgöra en sammanvägning av insamlad geologisk, geofysisk, geokemisk och geohydrologisk information.

Kapitlet organiseras i avsnitt som beskriver geologi, grundvattnets kemi, geohydrologi och bergets transportegenskaper.

Den sammanvägda platsmodellen är behäftad med osäkerheter som diskuteras i varje ämnesavsnitt och sammanfattas i ett avslutande avsnitt. Konsekvenserna av dessa osäkerheter i platsbeskrivningen vad gäller resultaten av säkerhetsanalysen redovisas dock senare i rapporten. Redovisningen av platsens egenskaper görs utifrån dagens förhållanden. Tidsberoende förändringar diskuteras i respektive ämnesavsnitt.

I denna rapport baseras platsbeskrivningen i kapitel 6 på geovetenskapliga data från Äspölaboratoriet. Detta innebär inte att Äspölaboratoriet kommer att utnyttjas för slutlig förvaring av radioaktivt avfall. Äspödata har använts på grund av att de utgör en ovanligt omfattande, inbördes sammanhängande geovetenskaplig databas för en specifik plats i kristallint berg. Kapitlet sammanställer det underlag som tagits fram t o m slutet av 1994. Det bör noteras att beskrivningen i detta kapitel kompletteras i avsnitt 10.3, där bergets funktion beskrivs. Funktionen diskuteras där allmänt men även speciellt för Äspö.

6.1 ALLMÄNT OM PLATSEN

6.1.1 Inledning

Ett antal funktions- och säkerhetsanalyser för djupförvar kommer att genomföras av SKB under de närmaste åren. En viktig fråga att studera i dessa analyser är bergbarriärens funktion i ett djupförvar. Platsspecifika data för tänkbara djupförvarplatser kommer emellertid att saknas till dess att platsundersökningar genomförts. I föreliggande rapport har därför platsdata hämtats från Äspölaboratoriet i Småland, som idag har den kanske mest omfattande av alla tillgängliga geovetenskapliga databaser för en specifik plats.

6.1.2 Äspö

På ön Äspö utanför Oskarshamn har SKB byggt en av Europas största fullskaliga anläggningar för fältförsök inom geologi, bergmekanik, geohydrologi

och grundvattenkemi, Äspölaboratoriet, se figur 6.1-1. Den består av en 3 600 m lång tunnel ner till 460 m djup, se figur 6.1-2. För 3 200 m av tunnelanläggningen tillämpades konventionell borrhning/sprängning. De sista 400 m av tunneln fullortsborrades med en tunnelbormaskin (TBM).

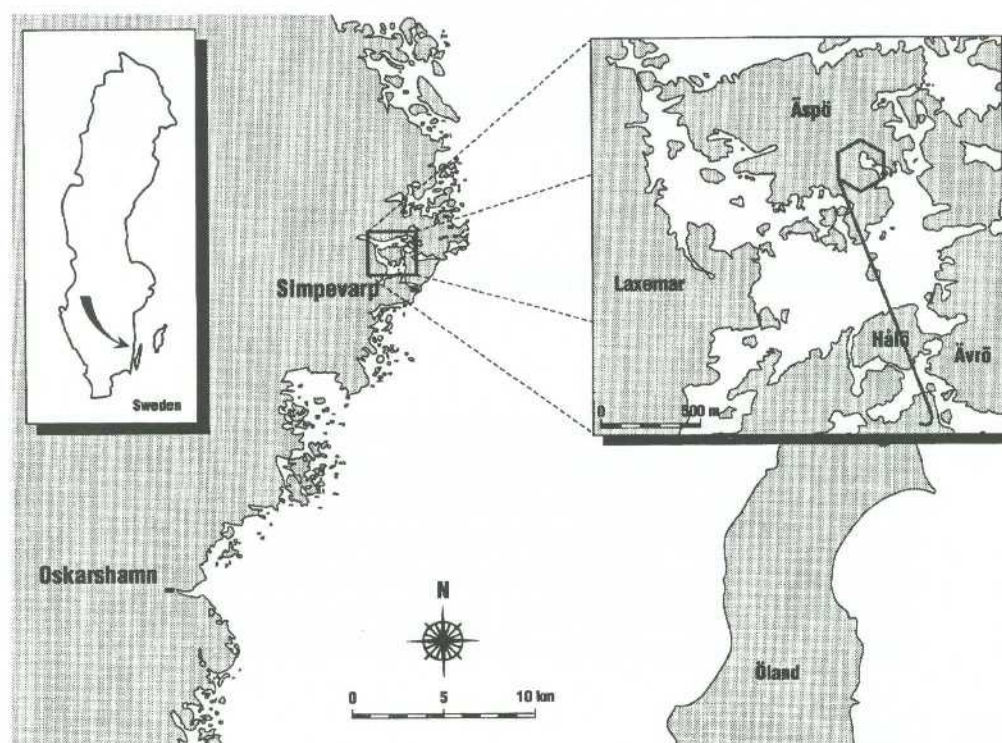
Äspö är vald för att det där finns en varierad och ostörd försöksmiljö inom ett begränsat område. Dessutom erbjuder närheten till Simpevarpshalvöns kärnkraftanläggning goda infrastrukturella förutsättningar. På Äspö finns hydrologiska förhållanden, berg och sprickzoner av olika karaktär. Berggrunden i området, till stor del Smålandsgranit, är mer än 1 700 miljoner år gammal. Den obebodda ön Äspö är flack, ca två km² stor och ligger vid kusten. Grundvattnets sammansättning är typisk för svenskt urberg vid Östersjön. Havsytan runt hela ön ger relativt väldefinierade hydrauliska randvillkor.

6.1.3 Översiktligt om genomförda undersökningar och tillgängliga data

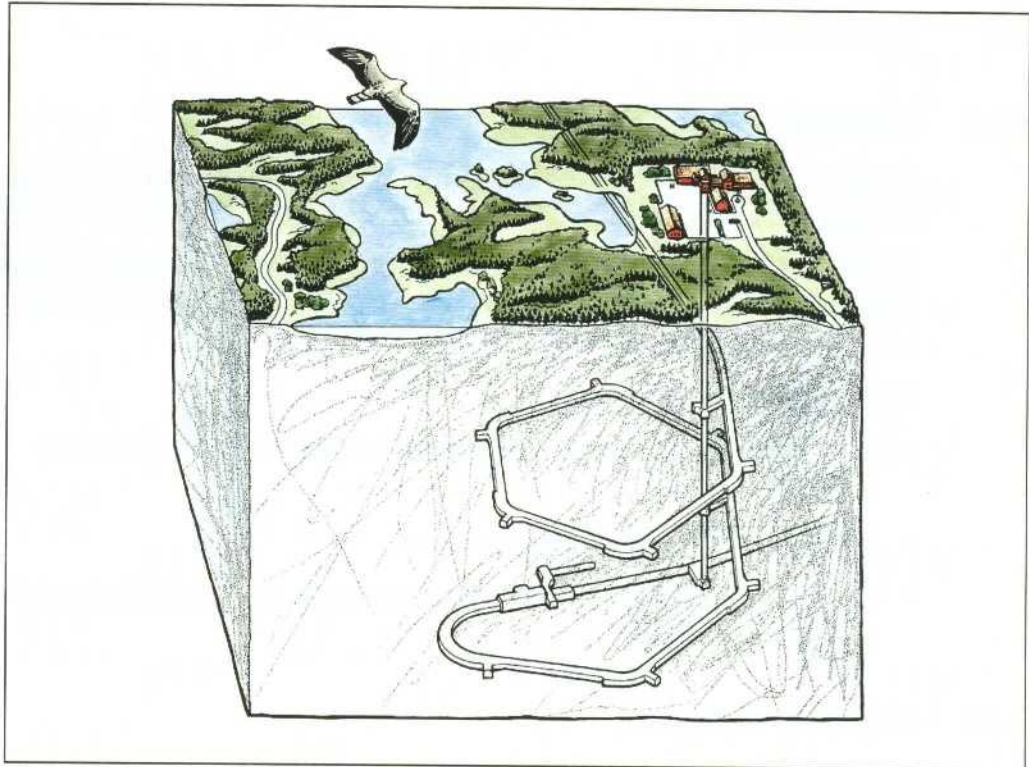
Förundersökningarna för att finna en lämplig plats för ett berglaboratorium startade 1986 i Simpevarpsområdet i Oskarshamns kommun. Ön Äspö identifierades ett par år senare och förundersökningarna fortskred fram till 1990.

Denna fas av arbetet var inriktat på att:

- finna en lämplig plats för laboratoriet,
- beskriva de naturliga förhållandena i berget, såväl regionalt som lokalt,
- förutsäga de förändringar som skulle inträffa vid byggandet.



Figur 6.1-1. Äspölaboratoriet vid Smålandskusten.



Figur 6.1-2. Äspölaboratoriets utformning. Längden på tunneln är 3 600 m ner till ett djup av 460 m. Den sista biten av tunneln fullortsborrades.

De geologiska, geofysiska, hydrologiska och grundvattenkemiska undersökningarna under denna fas har avrapporterats i åtta tekniska rapporter /6.1-1–6.1-8/. De avsnitt som följer kommer att summera dessa undersökningar.

Konstruktionsfasen påbörjades 1990 och slutfördes i början på 1995 i och med att tunnelutbyggnaden blev klar. Denna fas var inriktad på att:

- kontrollera de prediktionsmodeller som satts upp för geologin, bergmekaniken, geohydrologin och grundvattenkemin för Äspö under förundersökningsfasen,
- utveckla metodik för detaljerad underjordisk karaktärisering,
- utöka databasen för egenskaper hos granitisk berggrund för att förbättra modeller för beskrivning av flöde och transport i sprickigt berg.

För närvarande pågår experimentfasen av Äspölaboratoriet. Ett stort antal försök i olika skalor och inom olika discipliner kommer att genomföras under de kommande åren.

De illustrerande beräkningar som presenteras senare i denna rapport baseras på den strukturmodell av Äspö som fanns tillgänglig hösten 1994. Detta innebär att de undersökningar av olika slag som genomfördes under konstruktionsfasens sista skede inte beaktas.

6.2 GEOLOGI

6.2.1 Inledning

Bergets viktigaste säkerhetsmässiga roll är att ge stabila mekaniska och kemiska egenskaper så att de tekniska barriärernas långtidsfunktion inte äventyras.

När det gäller mekanisk stabilitet, ska förvaret förläggas i delar av berget som inte utgörs av zoner av uppsprucket berg i vilka framtida förkastningsrörelser av betydelse skulle kunna utlösas.

Gynnsamma förhållanden är

- för svensk berggrund normala bergspänningar och värmeledningsegenskaper,
- homogen och lättolkad berggrund,
- tillgång till bergblock med få sprickzoner och låg spricktäthet omgivna av tydliga svaghetszoner.

6.2.2 Läge och topografi

Landskapet i Äspöområdet karakteriseras av flacka landformer som är brutna av markanta sprickdalar med i huvudsak nord-sydliga, ost-västliga och nordvästliga riktningar. Området stupar svagt österut från 20–30 möh i väster till havsnivå på Simpevarpshalvön och öarna Äspö och Ävrö i Misterhults skärgård.

Jordtäcket, vanligtvis morän, är mestadels tunt och stora ytor utgörs av berg i dagen i form av flackt kupolformade mer eller mindre sammanhängande hållpartier. Lokala höjdskillnader är i regel mindre än 5 m. Depressioner mellan uppstickande berghällar är oftast täckta av skog eller myrmark.

6.2.3 Utförda geologiska undersökningar

De geologiska undersökningarna för Äspölaboratoriet har varit av mycket stor omfattning. I förundersökningsskedet genomfördes undersökningar inom ett ca 900 km² stort område. Målet var att konstruera en geologisk modell samt att göra geologiska prediktioner för den bergvolym i vilken Äspölaboratoriet skulle byggas. I samband med utsprängning av tunneln har kontinuerlig dokumentation och kompletterande undersökningar på tunnelnivå bidragit till ökad kunskap om berggrunden i Äspöområdet. Detta har i sin tur medgivit uppdatering av den geologiska modellen /6.2-1, 2/.

Geundersökningarna för Äspötunneln bedrevs stegvis i tre etapper under förundersökningsskedet åren 1986-1990. Sammanfattande redovisning av förundersökningresultaten finns i ett antal rapporter /6.2-3, 4, 5, 6/.

I en första etapp utfördes flyggeofysiska och gravimetriska undersökningar inom ett 25×35 km² stort område väster om Simpevarp /6.2-7/. Tillsammans med lineament- och satellitbildsstudier, översiktlig berggrundskartering och strukturgeologiska studier /6.2-8/ gav dessa insatser underlag till en första geologisk modell över Äspöområdet.

I en andra etapp koncentrerades undersökningarna till Äspö-Ävrö-Laxemar. Geofysiska markmätningar /6.2-9/, detaljerad berggrundskartering /6.2-10/ och inledande borrhningar /6.2-11/ bidrog till en djupare förståelse av den geologiska uppbyggnaden inom området.

I den tredje etappen koncentrerades undersökningarna till Äspö. Syftet var nu att i detalj beskriva den bergvolym på Äspö där Äspölaboratoriet skulle byggas, se figur 6.2-1. Undersökningarna omfattade bl a detaljstudier av bergartsfördelning, sprickor och andra strukturer längs frilagda bergytter på ön /6.2-12, 13/. Detaljerade magnetiska och elektriska markmätningar kompletterade de geologiska studierna /6.2-14/ och ett omfattande borrhprogram gav information om förhållandena på större djup i bergvolymen. Radarmätningar /6.2-15, 16/ och seismiska mätningar /6.2-17/ i kärnborrhålen bidrog till möjligheten att orientera de större sprickzonerna och fastställa en strukturmodell för Äspölaboratoriet /6.2-5/.

I samband med utsprängningen av tunneln har undersökningarna fortsatt i syfte att uppdatera den primära geologiska modellen. I tunneln har kontinuerlig dokumentation utförts av bl a bergarter och strukturer. Kärnborrhål har borrats för att närmare lokalisera och karakterisera större sprickzoner. Radar- och seismiska mätningar har gjorts för att orientera vattenförande strukturer.

6.2.4 Berggrundens sammansättning

Berggrunden i Äspöområdet domineras helt av granitiska bergarter av typ Smålandsgranit. Denna granit förekommer i olika varianter avseende färg och kornstorlek. En mera basisk variant går under beteckningen Äspödiorit /6.2-18/.

Som inneslutningar i den stora massan av Smålandsgranit finns större eller mindre massiv av basiska bergarter (gabbro och diorit). Mindre sliror eller linsar av en finkornig basisk bergart – som fått beteckningen grönsten – är också vanligt förekommande i Smålandsgraniten. På liknande sätt kan också mindre rester av gamla vulkaniska bergarter uppträda i graniten. Ett mycket karakteristiskt inslag i den regionala berggrunden i Äspöområdet utgör den grovkorniga och typisk massformig graniterna som uppträder i stora rundade massiv i Götömar och Uthammarområdet – norr respektive söder om Äspö. Dessa graniter är yngre än Smålandsgraniten och har trängt upp genom denna i form av runda proppar, s k diapirer. Magnetiska och gravimetriska data talar för att dessa diapirer har ett djup på ca 5 km /6.2-7/

Finkornig röd granit, och i mindre omfattning pegmatit, är vanliga inslag i bergmassan i form av smala gångar och oregelbundna sliror. Den finkorniga graniten förekommer dessutom som oregelbundna något större intrusioner i Smålandsgranit och Äspödiorit.
















6.2.5 Geologisk utveckling och strukturgeologiskt mönster

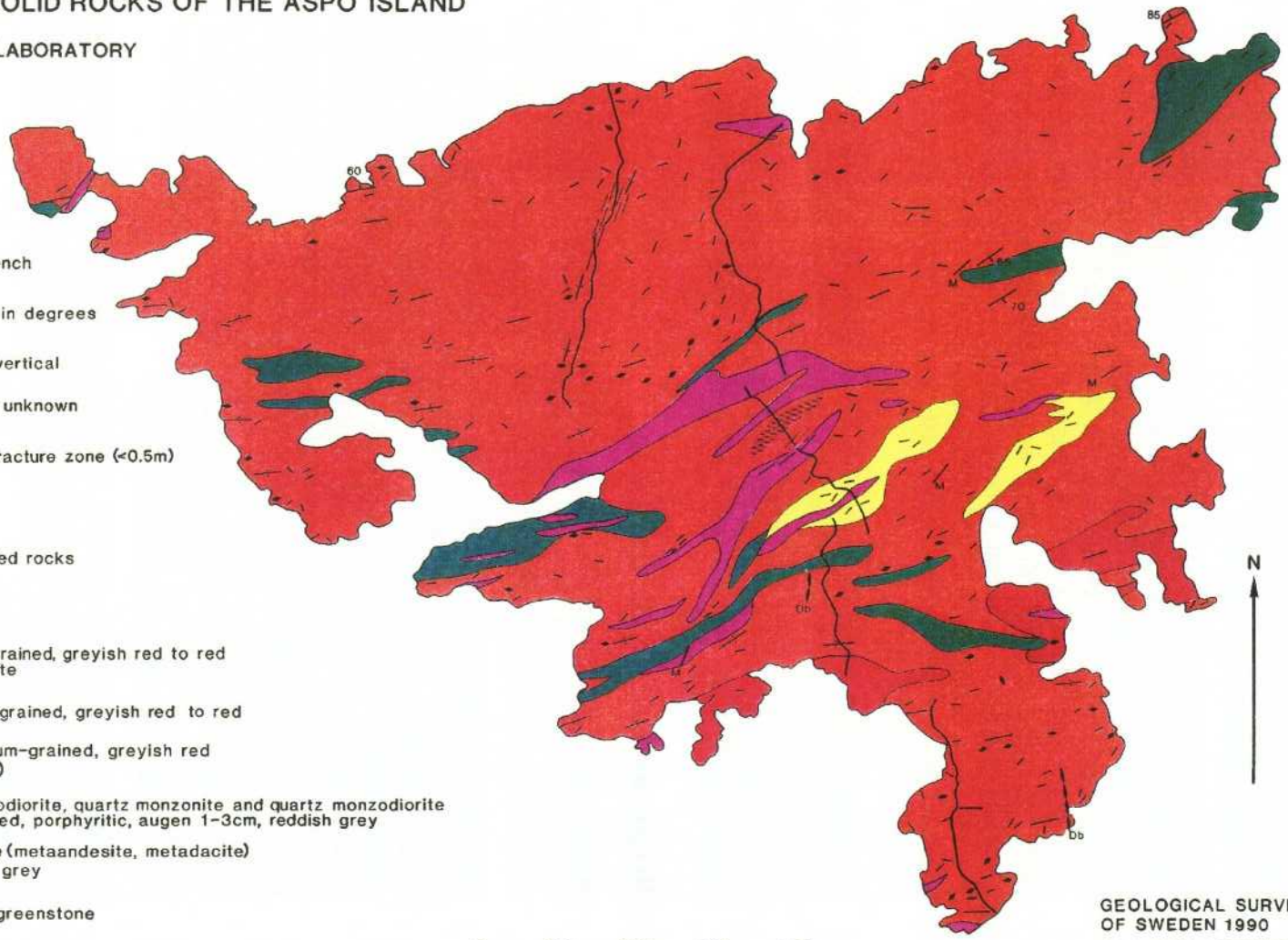
Äspöområdet har genomgått en tektonisk utveckling i flera faser. Deformationer har skett såväl i det plastiska stadiet i form av veckning – förmodligen flera faser – samt i den spröda, hårda bergmassan i form av sprickbildning och förkastningar. Den tidiga veckningsfasen som idag kan spåras i form av varierande grad av foliation eller förskifring i bergmassan har genomgående en orientering ca ONO med övervägande branta stupningar. Denna strukturriktning är

MAP OF THE SOLID ROCKS OF THE ÄSPÖ ISLAND

SKB HARD ROCK LABORATORY

LEGEND

-  Uncovered trench
-  60° Foliation, dip in degrees
-  Foliation, dip vertical
-  Foliation, dip unknown or vertical
-  /_M Mylonitized fracture zone (<0.5m)
-  Mylonite
-  Strongly foliated rocks
-  /_{Db} Diabase
-  Dikes of fine-grained, greyish red to red younger granite
-  Granite, fine-grained, greyish red to red
-  Granite, medium-grained, greyish red (Ävrö granite)
-  Granite, granodiorite, quartz monzonite and quartz monzodiorite medium-grained, porphyritic, augen 1-3cm, reddish grey
-  Metavolcanite (metaandesite, metadacite) fine-grained, grey
-  Xenoliths of greenstone
-  Greenstone (metabasalt), fine-grained



0 100 200 300 400 m

GEOLOGICAL SURVEY
OF SWEDEN 1990
KARL-AXEL KORNFÄLT
HUGO WIKMAN

Figur 6.2-1. Berggrundskarta över Äspö.

helt dominerande inom området och tycks i stor utsträckning ha haft en styrande inverkan på deformationen i senare faser /6.2-8, 6.2-12/.

Lineament och strukturer i Äspöområdet har speciellt framträdande orientering i O-V och N-S. Strukturer i riktning NV och NO är emellertid också vanliga. De geofysiska mätningarna gav mycket tydliga indikationer på ett strukturmönster med ovan nämnda orientering där framförallt de magnetiskt indikerade strukturerna kan vara åtskilliga km långa och upp till 100–200 m breda /6.2-7/. Senare utförda geofysiska markmätningar har visat att dessa regionala flygindikationer i allmänhet svarar mot maximalt tiotalet meter breda sprickzoner /6.2-9/. Runt dess sprickzoner har oxidation (omvandling av magnetit till omagnetisk hematit) ägt rum inom ett ofta ganska brett område vilket förklarar den flygmagnetiska indikationens omfattning. Exempel på en regional struktur med ungefärlig orientering i NO utgör den s k Äspö skjuvzon.

Deformationen av den spröda bergmassan i olika faser kan följas och tolkas genom studier av sprickor och sprickfyllnad i berggrunden. Fyra dominerande sprickriktningar kan urskiljas nämligen O-V, N60°V, N-S och N60°O /6.2-13/. Av dessa sprickor – som karterades på bergytan – har ca 85% en brant stupning (70–90°). Öppna sprickor är mest frekventa i riktning N55°V vilket stämmer väl överens med värdet på den största horisontella huvudspänning som uppmätts i borrhål på Äspö /6.2-19/. Kvartsfyllda sprickor är huvudsakligen orienterade N-S och O-V och de mycket karakteristiska rödfärgade (järnoxidfyllda) sprickorna tycks sammanfalla med de öppna sprickornas riktning i N55°V.

För hela Äspöområdet gäller att den finkorniga graniten och de finkorniga grönstenarna är mera uppspruckna än Smålandsgraniten och Äspödioriten.

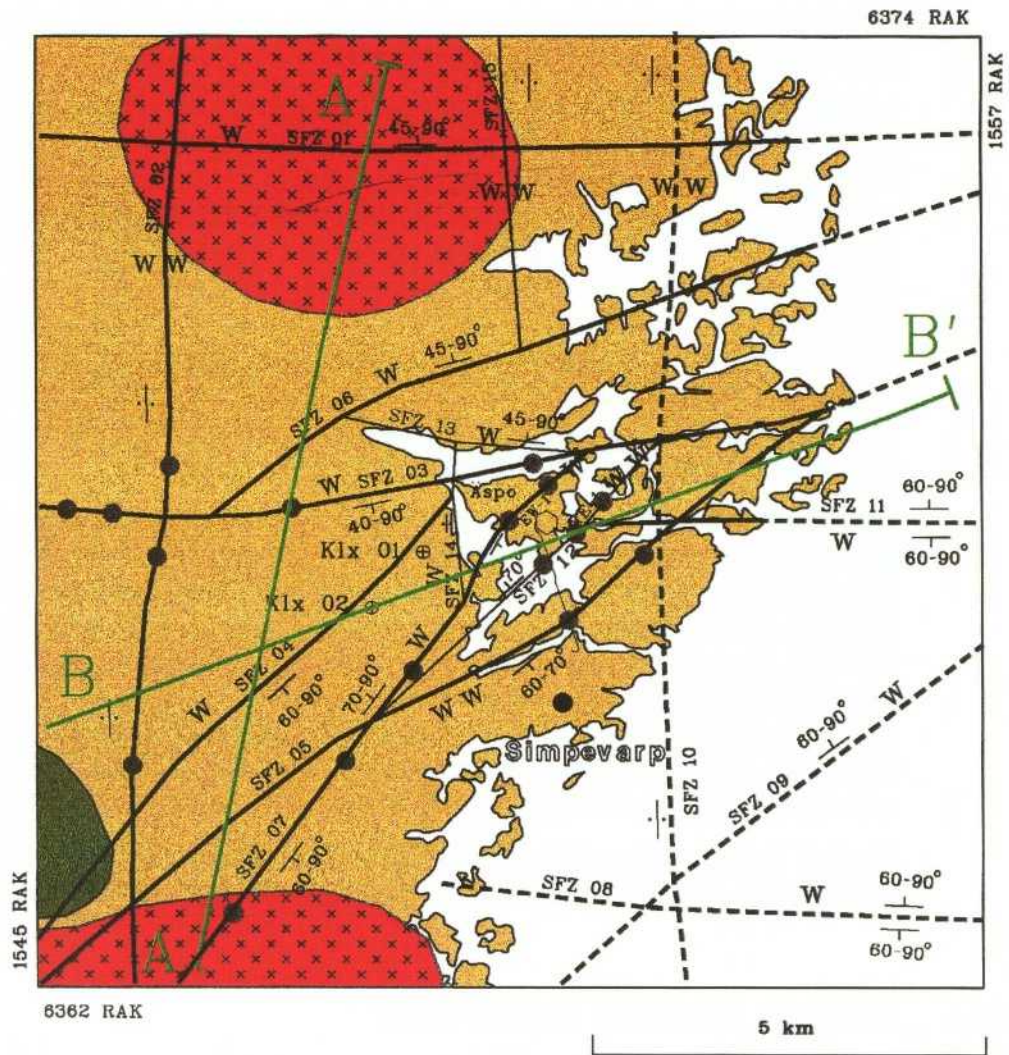
6.2.6 Geologisk modell av Äspöområdet

Den geologiska beskrivningsmodellen som nu presenteras utgör resultatet av en kontinuerlig uppdatering av de primära modeller som redovisades i samband med förundersökningarna för Äspölaboratoriet.

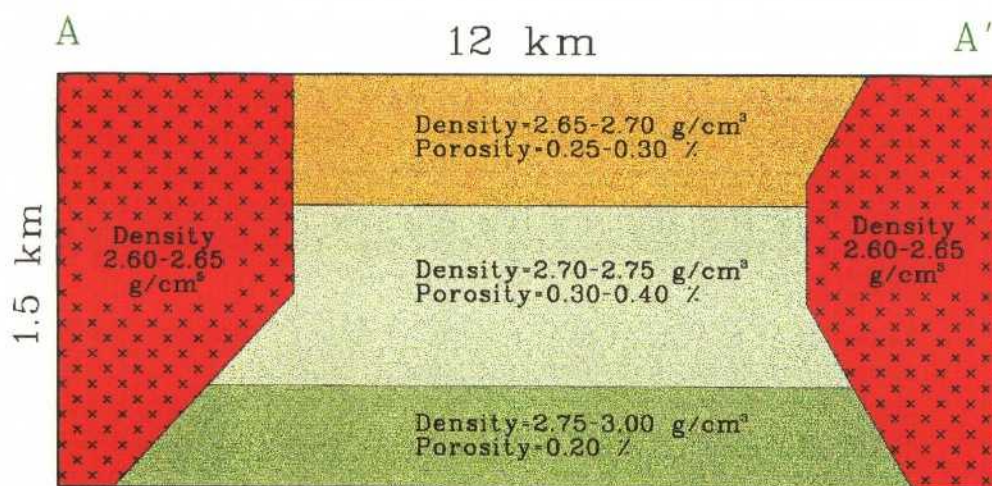
En regional strukturgeologisk beskrivning omfattar huvudsakligen större regionala strukturer, se figur 6.2-2. Dessa strukturer har definierats att i allmänhet ha en längdutsträckning i storleksordningen 10 km eller mera och en bredd av 100–300 m. Flertalet av dess strukturer är enbart indikerade med flyggeofysik och lineamentstudier. I vissa fall har kompletterande insatser i form av markgeofysik och borring bidragit till mera detaljerad kännedom om strukturernas karaktär. Speciellt gäller detta givetvis zoner som passerats i Äspötunneln /6.2-20/.

Som framgår av figurerna 6.2-2 och 6.4-1 finns ett system av strukturer med orientering i N-S och O-V och ett annat där riktningen NV-SO och NO-SV är mest framträdande. N-S strukturerna bedöms vara övervägande subvertikala och ha en mera öppen karaktär medan O-V strukturerna sannolikt kan variera i stupning från närmast vertikalt till medelbrant mot SSO. De senare uppvisar ofta en utpräglad förkastningskaraktär. NV-strukturerna sammanfaller till sin riktning med största huvudspänningens och har visat sig vara hydrauliskt konduktiva.

I samband med förundersökningarna observerades en "svärm" av smala, upp till några meter breda, närmast vertikala sprickzoner med huvudsakligen NNV



A — Cross section



Vertical section

Figur 6.2-2. Strukturmodell och litologisk modell av Äspöområdet i regional skala, 12·12·1,5 km³. Se även förklaring i figur 6.2-3.

eller NNO-riktning. Denna typ av strukturer har i tunneln – tillsammans med de mera nordvästligt orienterade zonerna visat sig vara de mest vattenförande.

Den litologiska modellen som presenteras i figur 6.2-3 ska närmast betraktas som en tolkning av bergartsfördelningen i Äspöområdet vid ett visst undersökningsskede. Den baseras på geofysiska data, kartering av ytberget samt den information på djupet som erhållits genom kärnbörning och studier i Äspötunneln. Denna starkt schematiska modell är indelad i tre horisontella element som representerar en relativt inhomogen bergmassa med granit (Smålandsgranit)– granodiorit med inneslutningar av vulkaniter och gångar av finkornig granit. Övergång mot djupet i mera basiska varianter (Äspödiorit) antas ske med tilltagande djup.

6.2.7 Bergmekanik

För bedömning av den mekaniska stabiliteten på Äspö utfördes bergspänningsmätningar i tre borrhål ned till 950 m djup i samband med förundersökningarna. Dessa mätningar kompletterades med bergmekaniska laborietester av borrhåll /6.2-21/.

I samband med utsprängningen av Äspötunneln har bergspänningsmätningar utförts successivt på olika nivåer. Även dessa mätningar har kombinerats med laborietester av bergmekaniska parametrar.

Sammanfattningsvis kan sägas att:

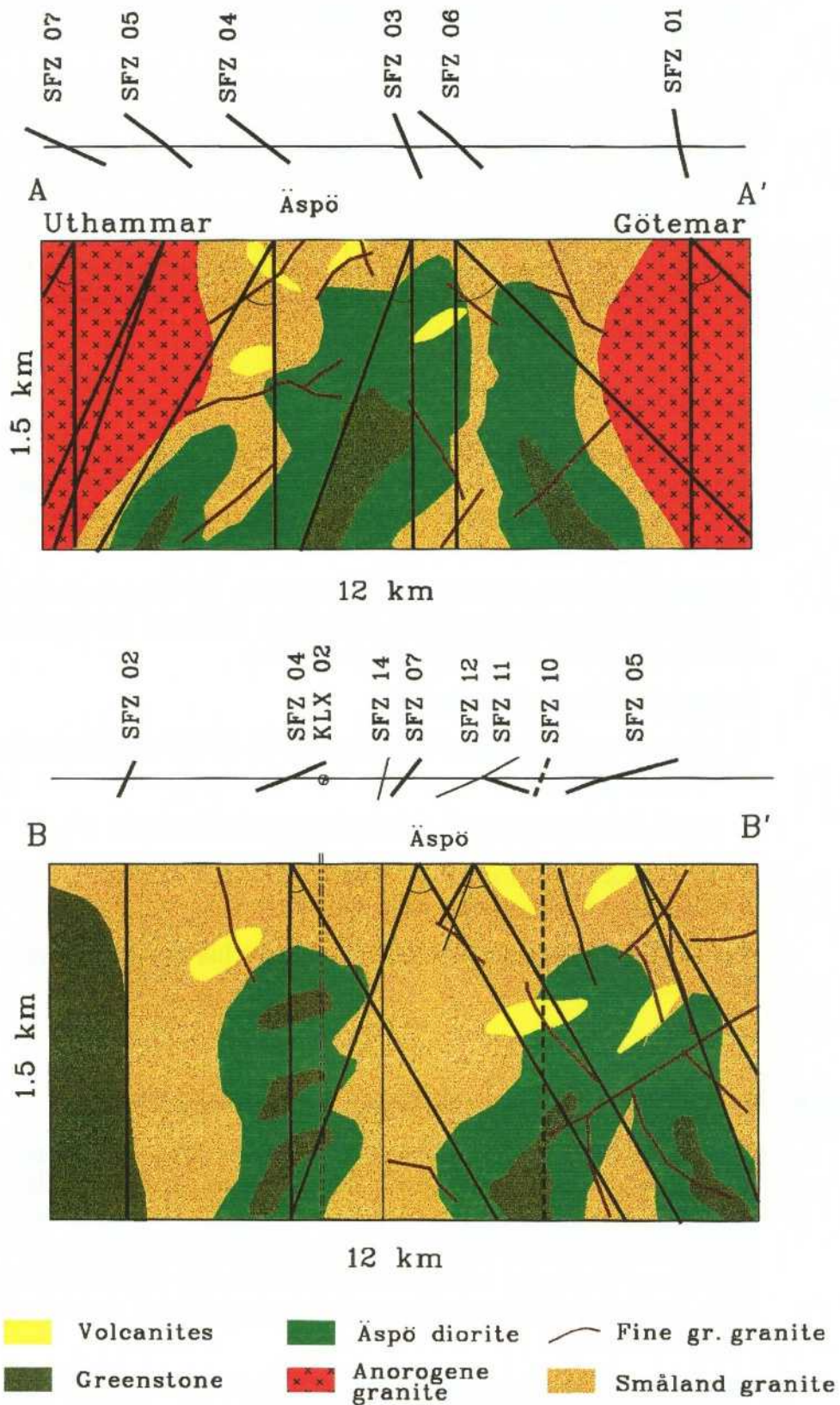
- största huvudspänningen är relativt hög, 30–35 MPa på förvarsdjup, och ökar mot djupet
- största huvudspänningens orientering är subhorisontell i NV-SO
- förhållandet mellan största och intermediära huvudspänningarna är i genomsnitt 1,9 men kan variera upp till 3

Några bergspänningsfenomen av typ smällberg har inte noterats ned till 460 m djup i tunneln.

6.2.8 Modellens osäkerhet och tidsberoende förändringar

Osäkerheten i den geologiska modellen varierar i hög grad med hänsyn till ingående parametrar. För de sk ”första ordningens strukturer” i den regionala strukturmodellen bedöms t ex osäkerheten vad gäller strukturernas geografiska läge i sidled till mellan 100–200 m när enbart flyggeofysiska och lineament-indikationer föreligger. I de fall då strukturernas läge verifierats med markgeofysik, geologiska fältobservationer och börning minskar givetvis osäkerheten avsevärt (5–20 m).

Osäkerheten i zonernas stupning och karaktär är mycket stor (20–30°) om enbart geofysiska data föreligger. Geologiska fältobservationer och framförallt börning ökar säkerheten avsevärt men är oftast baserad på enstaka avsnitt genom zonen. En relativt stor osäkerhet avseende stupning och karaktär föreligger därför nästan alltid för en större struktur såvida inte mycket omfattande undersökningar utförts.



Figur 6.2-3. Preliminär strukturmodell och litologisk modell av Äspöområdet. Visar bergartsfördelningen inom området. Vertikalsnittens position framgår av figur 6.2-2.

Tillförlitligheten av den litologiska modellen är beroende av bergets blottningsgrad och av geofysiska mätningar och kärnbörningsinsatser. Under gynnsamma förutsättningar är det möjligt att erhålla en god tillförlitlighet av den litologiska modellen vad avser procentuell fördelning av huvudbergarterna. Osäkerheten är däremot stor – eller mycket stor – vad avser den rumsliga fördelningen av mindre enskilda bergartsenheter t ex grönstenslinser eller oregelbundna sliror av finkornig granit.

Vad avser tidsberoende förändringar i bergmassan så kan förändringar i det nuvarande spänningsfältet i form av ökade eller minskade horisontalspänningar eller rotation orsaka rörelser i existerande sprickzoner. Det är dock inte möjligt att förutsäga riktningen av de påkänningar som kan tänkas påverka Äspöområdet i framtiden. Alla strukturer med stor regional utbredning är därför att betrakta som potentiella rörelsezoner. Förskjutningar sker främst i zoner med låg skjuvhållfasthet och mindre fördelaktig orientering i relation till det aktuella spänningsfältet /6.2-5/.

6.3 GRUNDVATTNETS KEMI

6.3.1 Inledning

Grundvattnet i djupförvaret ska vara stabilt kemiskt reducerande och ha egenskaper som bidrar till

- bevarande av bentonitens egenskaper,
- låg korrosionshastighet för kapselmaterialet,
- låg upplösningshastighet av bränslet,
- låg rörlighet och goda sorptionsegenskaper för radionukliderna.

I huvudsak förväntas de grundvattenkemiska förhållandena vara gynnsamma på de flesta platser. På ett djup av 100–1 000 m i berg med granitisk sammansättning/mineralogi och med reducerande förhållanden kommer de kemiska förhållandena knappast att avvika mer från plats till plats än vad den varierar inom en och samma plats.

Detta avsnitt ger en översikt av de grundvattenkemiska förhållandena på Äspö baserad på de undersökningar som genomförts inom Äspöprojektet. Ett referensvatten, representativt för förhållandena på 500 m djup, har valts utifrån redovisade resultat. Osäkerheter och variationer diskuteras i avsnitt 6.3.6 och avsnitt 6.3.4 ägnas åt redoxförhållanden.

6.3.2 Utförda geokemiska undersökningar på Äspö

Under förundersökningsfasen provtogs de flesta borrhålen på Äspö /6.2-5, 6.1-7/. Analysomfattning och provtagningsteknik varierade kraftigt från en sparsam variant som endast avsåg huvudkomponenter i prov tagna under borrning, till en mycket omfattande som dessutom inkluderade redoxkänsliga spårämnen, stabila och radiogena isotoper, löst gas, mikrober och kolloider. Under tunneldrivningsfasen har provtagning och analys utförts enligt ett uppställt pro-

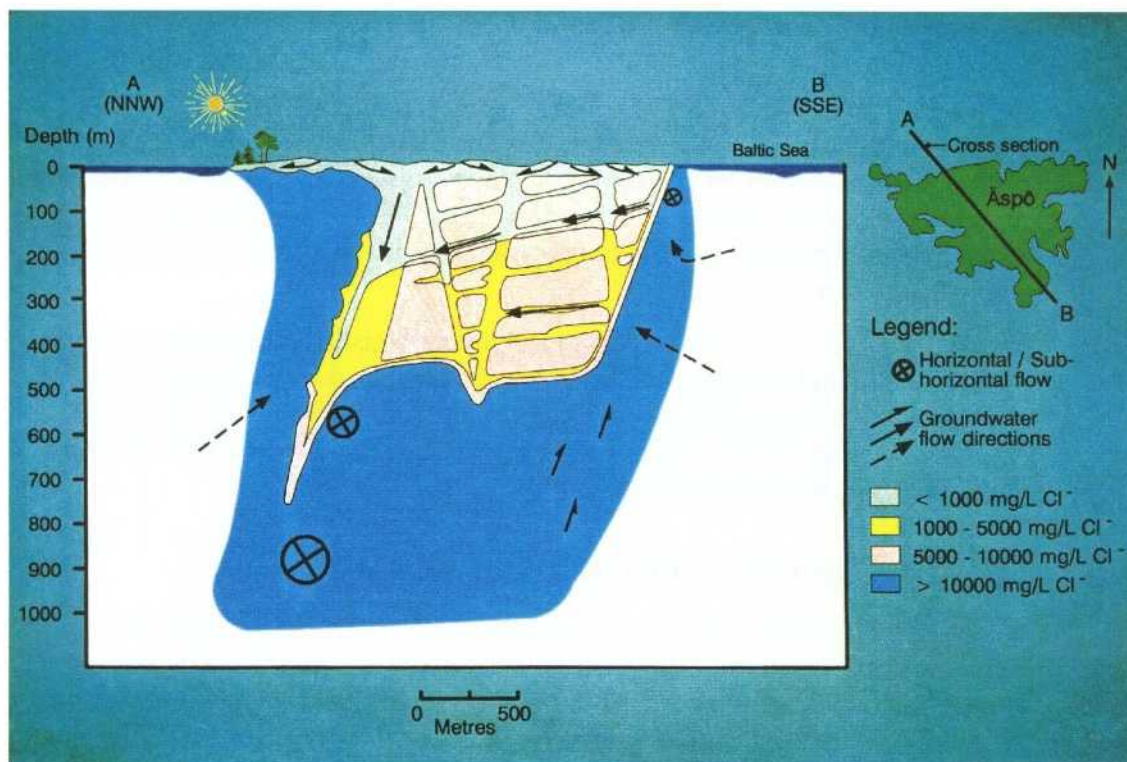
gram /6.3-2/. Resultat finns sammanställda i /6.3-3/. Resultat från de mera omfattande analyserna finns i /6.3-1/.

6.3.3 Grundvattenkemisk modell av Äspö

I berget under Äspö förekommer vatten av olika ursprung. De viktigaste identifierade klasserna är modernt vatten, Östersjövatten, sedimentvatten, glacialt vatten och gammalt saltvatten. Vid uttolkningen av dessa typvatten har även en hydrokemisk utveckling kunnat spåras.

I samband med senaste isavsmältningen transporterades smältvatten genom bergmassan ner till ett maximalt djup av mellan 400 och 600 m. Under efterföljande söt- och saltvattenstadier hos Östersjön har vattenkemin förändrats dramatiskt vid åtminstone ett tillfälle. Salt Litorinavatten trängde ut det lättare smältvattnet under den period som följde från ca 7 000 år sedan. Resultatet av detta är att andelen smältvatten är högre i de tätare bergpartierna än i konduktiva zoner, även om salthalten är snarlik. Vad gäller förhållandena för nuklidtransport och kemistabilitet är det viktigt att konstatera att vattnet under ca 500 m djup inte påtagligt påverkats av händelser som ägt rum efter den senaste istiden. Vattnet har således varit stagnant i ett tidsperspektiv av 10 000 år eller längre. På markytan har infiltrerat grundvatten tvättat ut saltvattnet ner till 40–50 m djup under de 3–4 000 år som gått sedan Äspö steg upp ur havet. En schematisk bild av de hydrokemiska förhållandena finns i figur 6.3-1.

I tunnelavsnittet som löper under havet från Simpevarpshalvön ut till Äspö förekommer bakteriell sulfatreduktion i stor omfattning. Processen har troligen samband med förekomsten av botten sediment som är rika på organiskt material. Den påträffade sulfatreduktionen har enligt beräkningar producerat en sulfidmängd motsvarande ca 100 mg/l vilket är mer än två tiopotenser större än



Figur 6.3-1. Grundvattenkemisk modell för Äspö.

den sulfidhalt som vanligtvis förekommer i grundvattnet, se tabell 6.3-1. På större djup under Äspö finns sulfatreducerande bakterier, men inget tecken på någon omfattande sulfatreduktion.

En samtolkning av hydrologiska, kemiska och biologiska data visar att det sannolikt är inslaget av ca 40% eller mer av gammalt Östersjövatten som stått i kontakt med bottensediment som gör att denna process pågått i stor omfattning. Kloridhalter i intervallet 4 000–6 000 mg/l och TOC-halter (totalt organisk material) på 10 mg/l korrelerar positivt med höga vätekarbonathalter, låga sulfathalter och förekomst av sulfatreducerande bakterier.

6.3.4 Redoxförhållanden

Redoxpotentialen (Eh-värdet) är ett mått på hur oxiderande eller reducerande förhållandena är. I förvarssammanhang bör vattnet vara så pass reducerande att uran uppträder i fyrvärd (=olöslig) form.

Praktiskt taget samtliga av de undersökta grundvattenproven har visat sig vara reducerande. Det är emellertid en kombination av både kemiska reaktioner i berggrunden och biologiska processer som bestämmer redoxförhållandena. I ett nyligen avslutat experiment på Äspö visade det sig företrädesvis vara bakterier som kvantitativt förbrukar det lösta syre som dras ned med inströmmande grundvatten mot tunneln. I detta sammanhang är det den höga halten av organiskt material i vattnet som bidrar till den bakteriella processen. Redoxbuffer-ten utgörs således inte enbart av reducerande mineral i berget utan tack vare bakteriella processer, så kan även t ex löst organiskt material bidra.

6.3.5 Referensvatten för Äspö

Ett referensvatten ska vara karakteristiskt för platsen och representera dagens grundvattenkemiska förhållanden på förvarsdjup, dvs omkring 500 m. Ett referensvatten för Äspö har valts, nämligen det från borrhålet KAS02, på ett djup av 530–535 m. Sammansättningen på vattnet finns i tabell 6.3-1. Osäkerheterna i dessa värden kan uppskattas på följande sätt:

Klorid-, bromid-, jodid-, sulfat-, natrium-, kalcium-, strontium- och litiumhalterna varierar med den totala salthalten. Eftersom dessa ämnen med några få undantag utgör huvudkomponenterna så är det också de som bestämmer jonbalansen i vattnet. Osäkerheten i halterna ligger inom $\pm 10\%$.

Kalium-, silikat- och fluoridhalterna är i jämvikt med bergets mineral och därmed relativt oberoende av variationer i salthalt. Fluoriden kan alltid bestämmas med god noggrannhet, $\pm 5\%$ eller bättre, medan kalium- och silikatanalyserna är osäkra i salt vatten, $\pm 50\%$.

Magnesiumhalterna kan bestämmas med hög precision. De varierar emellertid starkt mellan olika provtagningspunkter, utan att uppvisa någon korrelation med salthalten. Osäkerheten har uppskattats till $\pm 50\%$.

Mangan-, järn- och sulfidhalterna återspeglar redoxförhållandena. Analyserna är tillförlitliga men halterna varierar. Osäkerheten uppskattas därför till $\pm 50\%$, 90% respektive 90% för dessa element.

Vätekarbonathalten kan bestämmas som alkalinitet mycket exakt. Skillnader mellan provtagningspunkter gör att osäkerheten orsakad av variabiliteten bedöms vara $\pm 50\%$.

Kväveföreningarna nitrat, nitrit och ammonium samt fosfathalten ligger nära detektionsgränsen för analysmetoderna. Osäkerheten bedöms vara $\pm 100\%$.

Totalt organiskt material kan bestämmas med stor noggrannhet men proverna blir lätt förorenade t ex i samband med provtagningen. Det är därför inte möjligt att ge ett meningsfullt värde för osäkerheten i en enskild provtagningspunkt.

$pH \pm 0.1$ och $Eh \pm 25$ mV.

Tabell 6.3-1. Kemisk sammansättning hos referensvatten för djupförvaret på Äspö. Detta är hämtat från borrhålet KAS02. Alla halter är angivna i mg/l förutom pH och Eh. Osäkerheten i värdena är angiven inom parentes. Osäkerheten är en kombination av mätosäkerhet och osäkerhet i tolkningsmodellen.

Komponent	Halt	Komponent	Halt
pH	8.3 (0.1)	Eh	-300 (25) mV
natrium	2100 (200)	vätekarbonat	10 (5)
kalium	8.1 (4)	fluorid	1.6 (0.1)
kalций	1900 (200)	klorid	6400 (600)
magnesium	42 (20)	bromid	42 (4)
strontium	35 (4)	jodid	0.5 (0.1)
litium	1.0 (0.1)	sulfat	550 (60)
mangan	0.29 (0.15)	sulfid	0.18 (0.16)
järn	0.23 (0.2)	fosfat	0.009 (0.009)
silikat	4.1 (2)	nitrat	0.04 (0.04)
ammonium	0.03 (0.03)	nitrit	0.003 (0.003)
tot organiskt material	1.0		

6.3.6 Osäkerhet och variationer i tiden

I avsnitt 6.3.5 redovisades ett referensvatten för Äspö med angivande av osäkerheten i komponenternas halter. Det rör sig i vissa fall om en kombination av mätosäkerhet och konceptuell osäkerhet i tolkningsmodellen. För att använda dessa data för en generell beskrivning av en förvarsplats bör följande observeras:

Varje grundvattenkemisk provtagning är förenad med större eller mindre kontamineringsrisker. Dessa kan minimeras genom att provtagningsmetodik och utrustning väljs omsorgsfullt. Det är ändå omöjligt att helt utesluta störningar i form av föroreningar som i många fall härrör från själva borrhålen av de djupa kärnborrhålen. Bland parametrarna i tabell 6.3-1 är det främst halten av totalt organiskt material som är osäker av detta skäl.

De redox- och pH-känsliga parametrarna, pH, Fe, sulfidhalt och karbonathalt har en större relativ osäkerhet än övriga huvudkomponenter eftersom dessa kan påverkas av tryckförändringar och atmosfäriskt syre vid provtagningen. Mätningar på djupet i berget har ibland gett pH-värden som skiljt sig upp till en

pH-enhet från mätningar på markytan. Ofta har skillnaden legat kring 0.3 pH-enheter.

Salt vatten på stort djup i berggrunden, som på 500 m djup i Äspö, har en karaktär som indikerar att det rör sig mycket långsamt. Tolkningen på Äspö är att de förhållanden som rått efter senaste isavsmältning, ca 12 000 år tillbaka, endast har gett upphov till förändringar ned till 500 m djup. Nära markytan, ner till ca 50 m djup, har det salta vattnet tvättats ut fullständigt under de senaste 3 000 åren. På 500 m djup kan en förändring till sött vatten eventuellt tänkas ske i samband med avsmältningsfasen under en framtida istid.

6.4 GEOHYDROLOGI

6.4.1 Inledning

Eftersom grundvattnet i berget i praktiken utgör den enda spridningsvägen för radioaktiva ämnen från förvaret är alla förhållanden som har att göra med lösta ämnens transport med grundvattnet av potentiell betydelse.

De viktigaste faktorerna är:

- Grundvattenflödet på förvarsnivå, av betydelse för kapselns livslängd, uttransporttakten för de radioaktiva ämnena och eventuellt för upplösningen av bränslet.
- Transporttiden för lösta ämnen från förvaret till biosfären.

De geohydrologiska undersökningarna för Äspölaboratoriet har varit av mycket stor omfattning. I förundersökningsskedet var målet att konstruera en geohydrologisk modell samt att göra geohydrologiska prediktioner för den bergvolym i vilken Äspölaboratoriet skulle byggas. I samband med utsprängning av tunneln har kontinuerlig dokumentation och kompletterande undersökningar på tunnelnivå bidragit till ökad kunskap om berggrunden i Äspöområdet. Detta har i sin tur medgivit en uppdatering av den geohydrologiska modellen.

6.4.2 Utförda geohydrologiska undersökningar

Geohydrologiska undersökningar har genomförts i Äspöområdet för att identifiera huvudsakliga hydrauliska ledare i berget, deras hydrauliska egenskaper, samt randvillkor till det hydrologiska systemet /6.4-1, 2/. Bl a har följande typer av undersökningar genomförts:

- Insamling av hydrometeorologiska data genom kontinuerlig registrering
- Mätning av flödesfördelningen längs borrhål under pumpning (flödesloggning)
- Injektionstester i borrhål
- Grundvattenflödesmätningar i avgränsade borrhålssektioner (utspädningsmätningar)
- Hydrauliska interferenstester (provpumpningar)

- Spårämnesexperiment
- Flödesmätningar i tunnel

En sammanställning av tillgängliga hydrogeologiska data från Äspö ges i /6.4-3/.

6.4.3 Grundvattenyta och hydrometeorologi

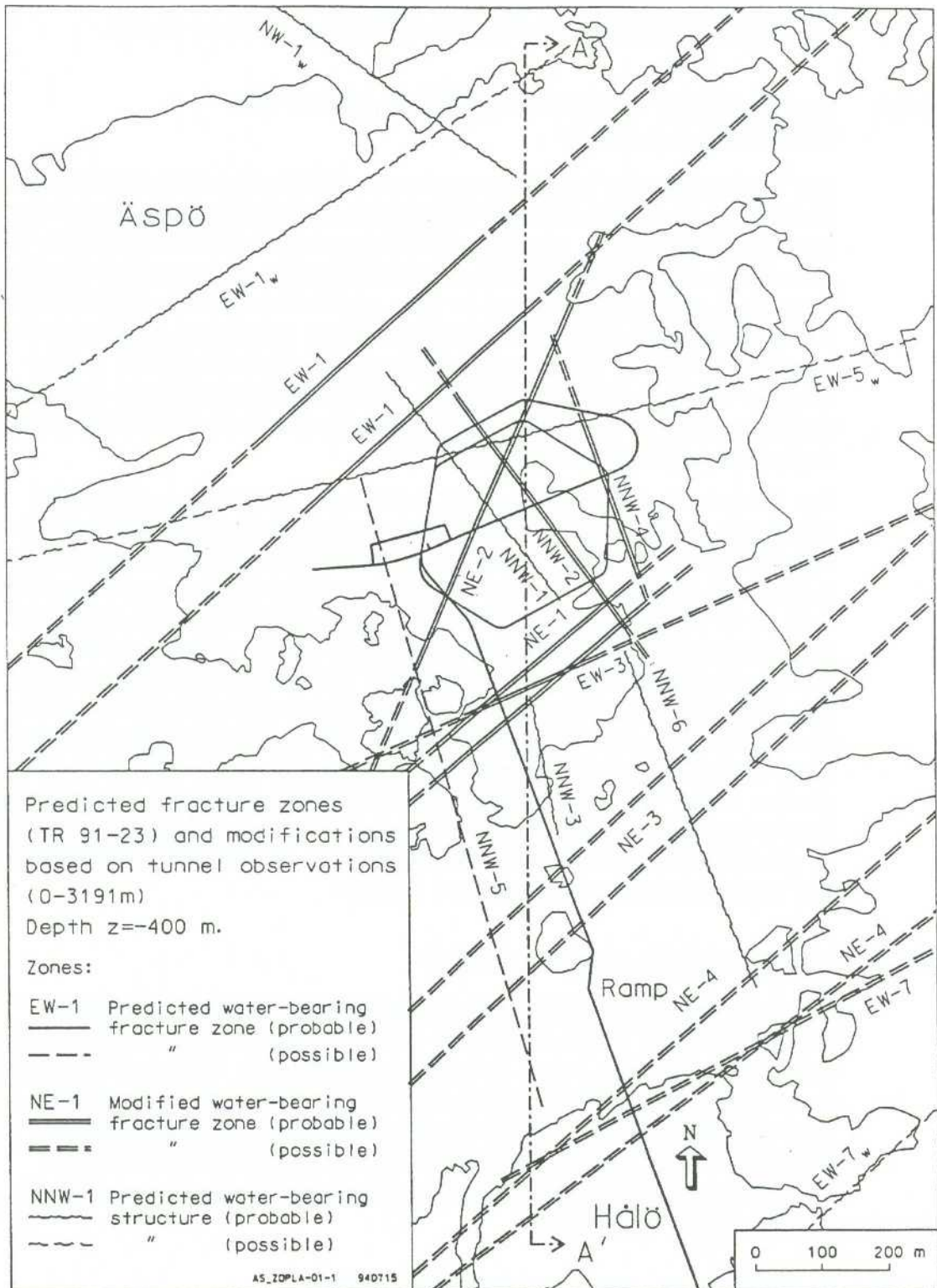
Grundvatten- och trycknivåer i borrhålssektioner registreras kontinuerligt på Äspö, under 1994 i cirka 60 borrhål /6.4-4/. Dessa registreringar syftar bl a till att dokumentera grundvattenförhållanden före, under och efter tunneldrivningen, samt att mäta responser orsakade av andra hydrauliska händelser som t ex mellanhålstester. Naturliga nivåvariationer orsakas av meteorologiska faktorer men också av tidvatteneffekter. Övrig hydrometeorologiska data som insamlas är nederbörd, havsvattennivå, lufttemperatur, och potentiell evapotranspiration, dvs den teoretiska evapotranspirationen från en yta fullständigt täckt av en homogen vegetationsyta.

Äspö består av flera relativt små avrinningsområden, i storleksordningen 10 000 m² och inga större ytvattendrag dränerar vatten från ön. Medelvärdet för nederbörden på Äspö är 650 mm/år. Medelvärdet för den potentiella evapotranspirationen är 616 mm/år och den beräknade faktiska evapotranspirationen 490 mm/år /6.4-5/. Uppskattningar av den genomsnittliga grundvattenbildningen till det djupare hydrauliska systemet i berget varierar mellan några få mm/år till 125 mm/år /6.4-6, 7, 11/. Allmänt kan man förvänta sig att grundvattenbildningen är koncentrerad till områden med större hydrauliska ledare som går i dagen eller har kontakt med genomsläppliga jordlager.

6.4.4 Berggrundens hydrauliska egenskaper

Berggrundens hydrauliska materialegenskaper varierar avsevärt /6.4-1/. Det mesta vattnet transporteras i stora hydrauliska ledare, se figur 6.4-1. Dominerande hydrauliska strukturer bestäms av det strukturgeologiska mönstret i stort. Baserat på förundersökningsresultaten anses Äspöområdet geologiskt sett bestå av tre områden /6.4-3/. Dessa områden löper som parallella band i nordöstlig riktning, se avsnitt 6.2. Det mellersta bandet utgörs av den s k Äspö skjuvzon. Speciellt i gränsen mellan områdena förekommer goda hydrauliska ledare som exempelvis zonerna NE-1 och EW-1. Goda hydrauliska ledare förekommer också i nord-nordvästlig riktning, och dessa kan delvis förmodas förbinda NE-zonerna och EW-zonerna hydrauliskt.

Genomsläppligheten i berget tolkas i stor utsträckning genom mätningar i borrhål, där den hydrauliska transmissiviteten skattas längs borrhålets längd. Vid injektionstester tolkas transmissivitetens värden från tryckresponser mellan manschetter. Detta har vid Äspö skett med 3 och 30 meters manschettavstånd. Vid s k flödesloggning tolkas transmissiviteten från inflödesmätningar längs borrhålet samtidigt som hela borrhålet pumpas relativt nära ytan. Från hydrauliska interferenstester finns tolkade värden för transmissivitet i zoner. Transmissivitetens värdena i zonerna ligger i regel i storleksordningen 10⁻⁵–10⁻⁴ m²/s /6.4-3/. Tolkade transmissivitetens värden från enhålstester i berget utanför zonerna ligger flera storleksordningar lägre och uppvisar stora rumsliga variationer /6.4-3/. I vissa fall finns även tolkade värden för magasinskoefficienter. Flödesporositeter



Figur 6.4-1. Tolkade sprickzoner på Äspö skärande ett horisontalplan på 400 meters djup /6.4-3/. Aktuell tolkningsmodell från hösten 1994.

finns tolkade från framför allt spårämnesförsök. Det s k LPT2-försöket gav porositetvärden i ett intervall av 0.0002–0.001 för sprickzoner /6.4-8/.

6.4.5 Avgränsningar i grundvattenflödessystemet och utströmningsområden

Den lokala topografin bedöms dominera det relativt ytliga flödessystemet (ca 50-100 m djup), medan flödet på större djup i allmänhet påverkas mer av regionala randvillkor och den storskaliga flödesgeometrin (sprickzonsstruktur). Vid större hydrauliska störningar, som t ex tunneldrivning, kan man dock förvänta sig att detta mönster förändras så att ytligt grundvatten dräneras till större djup. Denna process följs bl a genom hydrogeokemiska mätningar i avgränsade borrhålssektioner /6.4-9/. Grundvattenytan för ett grundvattenmagasin i det uppspruckna urberget motsvarar en integrerad piezometrisk trycknivå i det geohydrologiska systemet. Vid tunnelns anläggande har grundvattenytan på Äspö sänkts som mest med cirka 90 m /6.4-2/.

Den horisontella utbredningen av det grundvatten som passerar på omkring 500 m djup är relativt svårbestämd. Även om det storskaligt regionala hydrologiska systemet går från inströmning på fastlandet (småländska höglandet) till utströmning i Östersjön, bestäms sannolikt in- och utströmningsområden för ett tänkt förvar på 500 m djup av mönstret av hydrauliska ledare i den närmaste omgivningen /6.4-10/. Dominerande uthålliga vertikala strukturer med god vattengenomsläpplighet verkar troligen som hydrauliska begränsningar till ett förvarsområde. I praktiken innebär detta att man tar med ett område som bedöms "tillräckligt stort" för modellstudier av det hydrauliska systemet. Resultaten av modellberäkningar tyder på att de hydrauliska strukturerna inom ett avstånd av ca 800 m från de centrala delarna av Äspötunneln är de som huvudsakligen är styrande för flödet /6.4-11/. Figur 6.4-2 visar det område som används för modellberäkningar av grundvattenflödet inom Äspöprojektet, tillsammans med ytvattendrag och ytvattendelare i området.

6.4.6 Geohydrologisk modell av Äspö

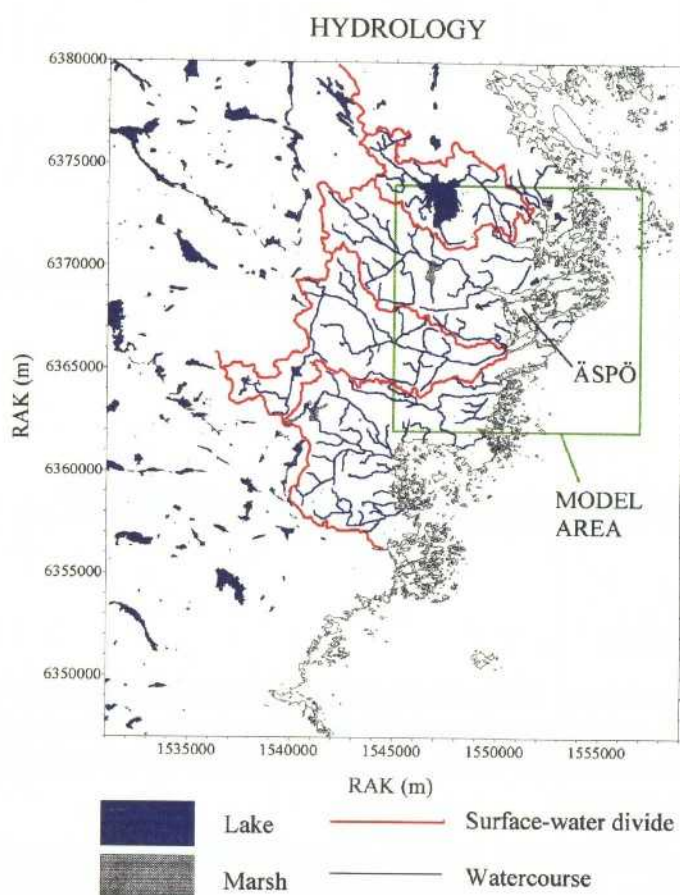
Den predikterade hydrauliska strukturmodellen från förundersökningarna /6.4-12/ har hittills endast modifierats i mindre utsträckning efter det att tunneldrivningen slutförts och ny information erhållits. För vissa zoner modifierades strykning och stupning, och dessutom utökades modellen med en zon i nord-nordvästlig riktning /6.4-2/. Dock kvarstår en hel del tolkningsarbete. Aktuella tolkade transmissivitetvärden för konduktiva strukturer, se figur 6.4-1, baserade på resultat från förundersökningarna såväl som under tunneldrivningen ges i tabell 6.4-1.

6.4.7 Osäkerhet och tidsberoende förändringar

Geohydrologiska osäkerheter finner man till stor del i bestämningen av den geohydrologiska strukturen, och inte minst sambandet geologiska indikationer – vattenförande strukturer /6.4-13/. I regel krävs mellanhålstester för att med säkerhet fastställa hydraulisk konnektivitet och egenskaper i huvudsakliga hydrauliska ledare /6.4-14/. Osäkerheter i tolkade materialegenskaper från hydrauliska försök i allmänhet är väldokumenterade /6.4-15/, och gäller även för data från Äspö. T ex används Coopers och Jacobs metod på återhämtnings-

fasen för att tolka injektionstester på Äspö /6.4-16/, medan flera alternativa tolkningsmodeller också är möjliga. Vidare finns det i regel inte tillräckligt med data på materialegenskaper i stora hydrauliska ledare för att ge en uppfattning om den rumsliga variabiliteten i zonerna /6.4-17/.

Bland långsiktiga naturliga förändringar med tiden i det hydrologiska systemet kan nämnas den kontinuerliga landhöjning som sker. Laxemar, på fastlandet strax väster om Äspö, lyftes ur havet för ca 7 000 år sedan, medan Äspö började sticka upp ur havet för ca 3 800 år sedan. Detta innebär att de hydrauliska randvillkoren till området är tidsberoende och att de naturliga flödesförhållandena i området är av transient natur. Kortvariga naturliga variationer utgörs framför allt av årstids- och tidvatteneffekter, vilka är märkbara i de flesta mätsektioner /6.4-4/.



Figur 6.4-2. Vattendelare och ytvattendrag i Simpevarpsområdet /6.4-3/.

Tabell 6.4-1. Tolkade transmissivitetvärden i sprickzoner. Transmissivitetvärden inom parantes anger att underlaget är bristfälligt. Tabellen ges i mer utförlig form i /6.4-3/. Sprickzonernas läge ges av figur 6.4-1.

Sprickzon	Transmissivitet [m ² /s]*10 ⁻⁵	Kommentar
EW-1	2.0	
EW-3	(2.0)	0–200 m djup
EW-3	0.05	>200 m djup
EW-5	2	
EW-7	0.6	
NE-1	45	0–300 m djup
NE-1	20	>300 m djup
NE-2	0.5	
NE-3	43	
NE-4	34	
NW-1	0.7	
NNW-1	2.0	
NNW-2	7	
NNW-3	2	
NNW-4	14	
NNW-5	(5)	
NNW-6	(5)	
NNW-7	2.7	

6.5 TRANSPORTEGENSKAPER I BERGET

6.5.1 Inledning

Transporten av lösta radionuklider påverkas i hög grad av deras kemiska egenskaper. Sorption av lösta radionuklider på mineralytor i berget hejdar eller i varje fall fördröjer uttransporten. Det bidrar till att radionukliderna hinner avklinga i berget.

Lösta radionuklider sorberas inte enbart på ytorna i de sprickor där grundvattnet flödar. Genom att diffundera in i bergmatrisens förbundna system av mikrosprickor med nära nog stagnant vatten så undandras radionukliden vattenflödet och den tillgängliga sorptionsytan ökar betydligt. Diffusionen in i mikrosprickorna och sorptionen där ger det dominerande bidraget till radionuklidretentionen.

I avsnittet diskuteras de egenskaper i berget som är av betydelse för transport av nuklider. Speciellt diskuteras resultat från Äspö.

6.5.2 Sorption och matrisdiffusion

Sorptionen innefattar en rad olika mekanismer, /6.5-1/. Några är delvis irreversibla. Styrkan i sorptionen 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 stor betydelse. Hög salthalt minskar sorptionen av Cs^+ och Sr^{2+} .

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. För att kvantifiera sorptionen så att den kan användas för transportmodellering används sk fördelningskoefficienter, K_d . De bestäms experimentellt i laboratorium. Man använder mineral och vattensammansättningar som är typiska för förvarsplatsen och provar sedan att variera de parametrar som är betydelsefulla t ex pH, jonstyrka och koncentration av radionuklider. De K_d -värden som sedan ska användas i säkerhetsanalysen väljs så att inte fördröjningen i radionuklidtransporten överskattas /6.5-2/. Komplexbildning med humus- och fulvosyror kan sänka sorptionen för en del av radionukliderna. Sänkningens storlek beror på hur radionukliden uppträder som löst jon och halten humusämnen i grundvattnet. De valda K_d -värdena är kompenserade för detta /6.5-2/.

Även om K_d -värden väljs konservativt för säkerhetsanalysen så kan de jämföras med vad som erhålles från fältförsök i naturlig miljö. För Äspö har hittills ett antal K_d -värden avrapporterats, /6.5-3/.

Matrisdiffusion av eventuellt lösta radionuklider kan ske till bergets mikrosprickstruktur som omger de mer påtagliga sprickorna och zonerna. Detta har en påtaglig retarderande effekt på såväl icke-sorberande som sorberande radionuklider. De viktigaste parametrarna som bestämmer indiffusionen till bergmatrisen är specifik yta tillgänglig för sorption, diffusionskoefficienten och diffusionsporositeten. Det finns fortfarande ingen bra metod att bestämma den specifika ytan men undersökningar pågår inom Äspöprogrammet.

6.5.3 Kolloider

Sorberande radionuklider skulle i princip kunna transporteras med vattnet om de fastnade på kolloidala partiklar i grundvattnet /6.5-8/. Medianhalten av kolloider i grundvattnet är mindre än 0,05 mg/l. De består av oorganiska partiklar, t ex kisel, järnhydroxid och lera och kan sorbera radionuklider. Är upptaget av radionuklider på kolloidala partiklar reversibelt så spelar det ingen roll för transporten ty i så fall lämnas nukliden över till berget någonstans i strömbanan. Skulle däremot nukliden fastna irreversibelt är det en helt annorlunda situation. I så fall kommer nukliden att transporteras med partikeln och i sämsta fall inte att fördröjas genom sorption i berget. Laboratieförsök bekräftar att radionuklider verkligen kan bilda kolloider och att till stor del är sorptionen på mineralkolloiderna reversibel. Styrkan i sorptionen svarar ungefär mot uppmätta K_d för motsvarande mineral och ämnen /6.5-4/.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att radionuklider i grundvattnet kan förekomma som kolloider och att det inte helt kan uteslutas att en liten andel binds irreversibelt till mobila naturliga kolloidala partiklar. Emellertid visar beräkningar att även för ett sådant extremt fall är konsekvenserna utan betydelse för säkerheten. Utvärderingen är sammanfattad i /6.5-5/.

6.5.4 Bakterier

Bakterier kan inverka på en rad förhållanden av vikt för isolering av radioaktivt avfall, t ex migration, löslighet och gasbildning /6.5-6/. Bakterierna kan vara till fördel, som att medverka till kemisk reduktion av syre och radionuklider, eller till nackdel, som att reducera sulfat till sulfid.

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 /6.5-6/. Miljön är fattig på näringsämnen. 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, t ex i det djupa grundvattnet på Äspö uppmäts halter mellan ett par miljoner och tiotusen bakterier per ml /6.5-7/.

Betydelsen av bakterietransport för säkerheten har analyserats på samma sätt som för oorganiska kolloider /6.5-5/. Slutsatserna är desamma, den saknar betydelse för säkerheten.

6.5.5 Osäkerhet och tidsberoende förändringar

Beträffande kolloider i djupa grundvatten, kan halten av dessa i princip öka i samband med avsmältningen efter en istid. Dock visar nya studier att de redan låga halterna består även i detta fall /6.5-8/.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att laboratorieförsök och fältförsök visar att sorptionen av radionuklider på mineralytor och diffusion in i bergets mikrosprickor är robusta retardationsmekanismer som inte påverkas nämnvärt av framtida eventuella förändringar i grundvattnets kemiska sammansättning.

6.6 OSÄKERHETER I PLATSMODELLEN

6.6.1 Inledning

Beskrivningen av en plats är behäftad med osäkerheter, vare sig det rör sig om en geohydrologisk, geokemisk eller geologisk beskrivning. Med nödvändighet begränsade platsundersökningar gör att dessa osäkerheter alltid kommer att finnas.

6.6.2 Platsegenskapernas allmängiltighet

Den geologiska modellens allmängiltighet för svenskt urberg

Den regionala geologiska modellen över Äspöområdet kan i stort sägas vara representativ för svenska urbergsförhållanden speciellt vad gäller granitiska avsnitt. Litologiskt är olika granitvarianter helt dominerande och strukturgeologiskt ser man att granitmassan styckas upp i plintar av större strukturer med ett inbördes avstånd av 3-5 km. På ön Äspö där berglaboratoriet byggts, föreligger större litologisk inhomogenitet och något större sprickfrekvens än i omgivande delar av Äspöområdet vilket ger större variationsmöjlighet för olika experiment.

Den grundvattenkemiska modellens allmängiltighet för svenskt urberg

De grundvattenkemiska förhållandena i svenskt urberg har undersökts i samband med SKBs typområdesundersökningar under början av 80-talet, samt i Stripa, Finnsjön, Laxemar och på Äspö. I samtliga dessa undersökningar har analyserna fokuserats på de komponenter som bedöms vara av största betydelse för förvarets långtidssäkerhet.

Äspöområdet representerar en vattenkemisk situation som kan anses vara karakteristisk för Östersjökusten, se avsnitt 6.3. Liknande förhållanden har återfunnits i Finnsjön och i SFR. Längre upp från kusten kan man förväntas få icke-salt (0-1000 mg/l Cl⁻) grundvatten även på stort djup, dvs längre ned än 500 m.

Karbonathalt, järnhalt och sulfathalter kan variera lokalt till följd av bakteriella processer vilka kan ske inom ett begränsat område på en plats. Däremot verkar redoxförhållandena vara snarlika på samtliga undersökta platser, Eh -200→-400 mV, dvs reducerande förhållanden. pH-värdet ligger oftast i intervallet 6–9.

Halterna av partikulärt och organiskt material varierar kraftigt mellan provtagningspunkterna men är snarlika inom de undersökta områdena. Däremot kan ett allmänt djupavtagande i halterna konstateras.

Den geohydrologiska modellens allmängiltighet för svenskt urberg

Om salt grundvatten förekommer i berggrunden avspeglar detta att grundvattensättningen är låg eller t o m stagnant. Dessa förhållanden finns på Äspö och detta kan betraktas som typiskt för ett kustnära läge längs Östersjön. Förekommande utströmningsområden, hav eller havsvikar, är naturligtvis också typiska för ett kustnära läge.

Frekvens av och hydrauliska egenskaper för den uppsättning sprickzoner som identifierats för Äspö avviker inte nämnvärt mot vad som kan förväntas för en annan plats i Sverige. När det gäller bergmassans hydrauliska konduktivitet har SKB från typområdesundersökningarna ofta konstaterat ett djupavtagande. Detta är inte lika tydligt för Äspö.

Flacka sprickzoner har identifierats på flera platser i Sverige, t ex Finnsjön, och deras betydelse för grundvattensituationen är påtaglig, /6.6-1/. Det har dessutom hävdats att de bör förekomma med en viss frekvens i svensk berggrund, /6.6-2/. I Äspöområdet har inga flacka zoner påträffats.

De smala NV-NNV strukturerna, som visat sig vara hydrauliskt betydelsefulla på Äspö, har sannolikt sin motsvarighet i många andra granitmassiv i det svenska urberget.

6.6.3 Sammanvägd platsmodell

Ett flertal modeller har upprättats för berggrunden runt Äspö. Dessa omfattar t ex bergarter, geologiska strukturer, grundvattenkemi, geohydrologi och mekanisk stabilitet. Modellerna som tagits fram på basis av förundersökningarna redovisades i /6.6-3/. För att pröva modellerna upprättades också detaljerade prognoser av de förväntade data som skulle samlas in under det att anläggningen byggdes. Den slutliga utvärderingen av tillförlitligheten vid Äspöundersökningarna kommer i sin huvudsak att rapporteras under 1996, men baserat på

preliminära slutsatser har de geologiska, geokemiska och den geohydrologiska modellen för Äspö presenterats i avsnitt 6.2 till 6.4.

Inom Äspöprojektet har kopplingen mellan de olika ämnesområdena varit väsentlig för att på bästa sätt kunna ta fram en sammanvägd platsmodell för Äspö. Platsmodellen är utgångspunkten för en platsspecifik säkerhetsanalys och ger nödvändig information för beskrivning av den naturliga barriären i förvarssystemet.

Platsens eller platsmodellens betydelse för den långsiktiga säkerheten har varit föremål för många studier, t ex säkerhetsanalysen SKB 91.

6.6.4 Osäkerhet i platsbeskrivningen

Beskrivningen av en plats är behäftad med osäkerheter, vare sig det rör sig om geohydrologi, geokemi eller geologi i kristallint berg. Detta har diskuterats för varje ämnesområde i avsnitt 6.2 till 6.4. Därmed finns det också utrymme för alternativa tolkningar av hur t ex sprickzonsgeometrin tar sig ut. Äspöprojektet har arbetat med en enda beskrivande modell alltsedan starten av projektet 1986. Denna platsmodell, som täcker ungefär 1 km³ berg kring laboratoriet, har successivt uppdaterats i takt med förundersökningarna och undersökningarna under byggandet. Förtroendet har på så vis gradvis ökat i takt med att osäkerhetsintervallen minskar. Ett viktigt verktyg för att öka förtroendet är att utföra storskaliga pumptester i området och mäta responser i de borrhål som finns tillgängliga. Två sådana långtidspumptester har utförts hittills.

En speciell klassificering av sprickzoner används inom Äspöprojektet. Sprickzonerna benämns "säkra, troliga eller möjliga". Detta ger ett visst underlag för att utföra variationsanalyser av sprickzonernas betydelse för beskrivningen av t ex nuklidtransport. En speciell svårighet vid karakterisering av berget utgör de relativt vattenförande sprickzonerna i NV-NNV riktning som nämnts i tidigare avsnitt. De är smala och svåra att upptäcka. Det bör därför antas att ytterligare zoner i den riktningen kan existera med likartade hydrauliska egenskaper och effekterna av sådana bör belysas vid analys av nuklidtransport.

Även i en större geometrisk skala (12·12·1,5 km³) har en beskrivande platsmodell tagits fram för Äspöområdet. Här är givetvis osäkerheten större vad gäller t ex sprickzoners och bergarters karakteristik mot djupet. Den ovan nämnda klassificeringen av sprickzoner är inte lika detaljerad och stupningen av zoner anges dessutom med stora osäkerhetsintervall.

6.6.5 Osäkerhetens potentiella betydelse för den långsiktiga säkerheten

Osäkerheten i platsmodellen har betydelse för beskrivningen av den naturliga barriären i djupförvarssystemet. Osäkerheter i vattenförande strukturers existens, riktning m m mot djupet gör att många flödesvägar från förvaret till biosfären är tänkbara. Bedömningar av osäkerhetsintervall inom ramen för platsbeskrivningen gör dock att det är möjligt att definiera olika variationsfall i säkerhetsanalysen. Dessa fall kan användas för att studera osäkerheternas konsekvenser. I SKB 91, /6.6-1/, genomfördes många variationsfall av denna typ och speciellt studerades inverkan av flacka strukturer. De konstaterades ha en stor betydelse för grundvattenströmningen kring ett djupförvar.

En fullständig säkerhetsanalys ska innehålla redovisning av konsekvenser av osäkerheter i platsbeskrivningen. I SR 95 ges dock endast illustrerande beräkningar för ett basfall.

Olika studier har på senare år genomförts för att visa på platsinformationens, fältdatas, betydelse för beskrivning av relevanta mått för fjärrzonsbarriären och framför allt hur osäkerheten i resultaten påverkas av successivt ökad informationsmängd. En del av dessa studier har varit begränsade till geohydrologisk modellering och borrhålstester, t ex /6.6-4/, medan andra varit mer allmän-giltiga och studerat dosutsläpp i biosfären från ett avfallslager, /6.6-5/.

Ett mer konkret projekt har dessutom genomförts för att belysa hur beskrivningen av Äspö har förändrats från 1990, då förundersökningfasen slutfördes, till 1995, då konstruktionsfasen av Äspölaboratoriet avslutades, /6.6-6/. Inriktningen har helt och hållet varit mot att beskriva Äspö med relevanta mått för fjärrområdet under naturliga förhållanden och inte hur t ex olika sprickzoner tolkning eller salthalter i grundvattnet förändrats under Äspöprojektets gång. Konkret belystes hur mycket bättre fjärrzonen för ett tänkt djupförvar kan beskrivas i en säkerhetsanalys när man väl går ner i berget. Som relevanta mått för fjärrområdet valdes:

- vattentransporttider från en tänkt förvarsnivå i berget till biosfären,
- utströmningsområdets läge, och
- grundvattenflöden i sprickzoner där det finns utspädningsmätningar under naturliga förhållanden tillgängliga.

Slutsatserna är starkt kopplade till dessa mått.

Det bör påpekas att denna utvärdering möjligen är väl tidigt genomförd då Äspöprojektet ännu inte slutgiltigt uppdaterat sina geologiska, geokemiska och geohydrologiska modeller. Arbetet baserar sig på preliminära tolkningsmodeller och dessa kommer säkerligen att förändras innan konstruktionsfasen är att betrakta som avslutad. De erhållna preliminära resultaten pekar dock mot att de utförliga förundersökningar som genomförts vid Äspö enbart i sig ger en mycket god bild av geohydrologiska förhållanden kring ett djupförvar. Bilden av sprickzoner existens och utbredning samt zonernas hydrauliska egenskaper har ännu inte ändrats dramatiskt under byggandet av laboratoriet vilket också direkt påverkar beskrivningen av fjärrzonen under naturliga förhållanden. Den exakta positionen för sprickzoner spelar inte så stor roll för bergbarriärens funktion ur säkerhetssynpunkt. Studien visar också att strömbanor och utströmningsområdets position är känsligare mått för fjärrområdet med avseende på olika tolkningsmodeller. De dominerande transportvägarna är desamma och har endast förändrats i den mån zonerna går i dagen annorlunda.

7 INPLACERING OCH UTBYGGNAD AV FÖRVARET

Förvarsutformningen i kapitel 5 är generell till sin natur, dvs oberoende av någon detaljerad kunskap om platsens specifika egenskaper. I praktiken behöver utformningen av ett förvar alltid anpassas till den specifika platsen. Detta kapitel beskriver vilka platsanpassningar som genomförs på den förläggingsplats som är aktuell för redovisningen. Anpassningarna kan gälla hur de olika förvarsdelarna förläggs i förhållande till varandra, hur tunnlar/schakt och deponeringsområden placeras, eller hur djupt ner i berget olika anläggningsdelar placeras. Anpassningar kan också behöva genomföras med hänsyn till sprick- eller svaghetszoner, bergkvalitet, grundvattnets strömningsvägar eller biosfärens recipienter för djupt grundvatten.

Kapitlet diskuterar också möjligheter till anpassning under utbyggnadens gång, alternativutformning och den kvarstående frihet vad gäller utformning som finns för framtida optimering.

I denna rapport är förvarets anpassning till platsen, dvs till Äspö-förhållanden, endast delvis genomförd.

7.1 PLATSENS INVERKAN PÅ FÖRVARETS LAYOUT

7.1.1 Allmänt

Den beskrivning av djupförvaret som redovisas i kapitel 5 består dels av en detaljerad beskrivning av storlek och form på tunnlar, deponeringshål och bergrum, dels av en skissartad layout över deras inbördes placering. Former och storlekar är endast i liten omfattning beroende av platsens egenskaper, medan layouten över inbördes placering är starkt platsberoende.

7.1.2 Inbördes placering av förvarsdelar

Placeringen av olika förvarsdelar tar i första hand hänsyn till berg- och byggförhållanden. En viktig fråga är hur och var passagen från ett bergblock till ett annat ska ske. Ett grundläggande krav är då att stabila tunnlar och schakt kan byggas. Dessutom får vatteninflödet inte bli för stort.

Inom bergblocken för deponering av använt kärnbränsle kommer layouten att styras av bergets temperatur och värmeledande egenskaper, så att bentonitbufferten inte exponeras för en högre temperatur än vad som tillåts, se vidare avsnitt 7.2.

7.1.3 Form och storlek på bergutrymmen

Platsberoendet hos form och storlek på bergutrymmena är i första hand förknippat med bergspänningar och berghållfasthet. Berghållfastheten i sin tur bestäms av bergartens hållfasthetsegenskaper och dess struktur av diskontinuiteter. På ca 500 m djup i svensk berggrund är spänningarna i allmänhet inte av en sådan storlek att berghållfastheten överskrids i tunnlar, deponeringshål och bergrum med de geometrier som valts i utformningen beskriven i kapitel 5. Sannolikheten för justeringar bedöms som störst för de större bergrummen, som finns i centralområdet och i området för annat långlivat avfall.

7.1.4 Erfarenheter från inplacering av tunnlar och bergrum i Äspölaboratoriet

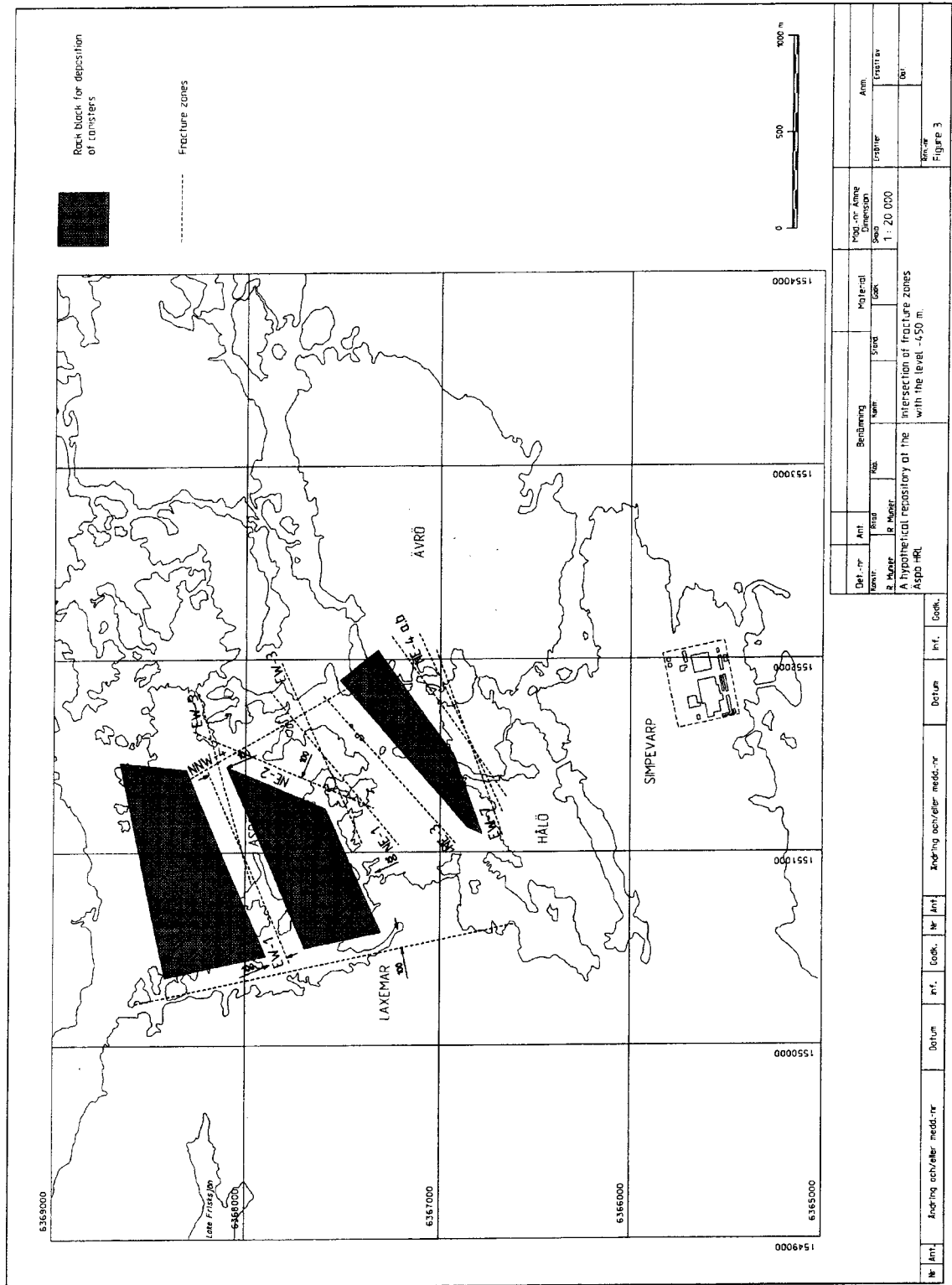
I /7.1-1/ redovisas en utformning som baserats på data från Äspö. Berghållandena där har inte givit anledning till någon förändring av tunnlar och bergrummens form och storlek. Layouten har gjorts med hänsyn till bergmassans ojämna sammansättning, det lokala spänningsfältet och orienteringen av vattenförande diskontinuiteter. Hänsyn har också i detta speciella fall tagits till befintligt tunnelsystem samt till möjligheten att ansluta centralområdet under jord med ovanjordsanläggningen.

Resultatet med nuvarande kunskap om förhållandena är att den lämpligaste förvarsnivån bedöms vara på 450 m djup. Den undersökta bergvolymen på Äspö är emellertid inte tillräcklig för att rymma hela djupförvaret utan skulle endast ge plats för centralområdet och Deponeringsområde I, dvs ca 10 % av antalet kapslar. Dominerande begränsningar är brantstående diskontinuiteter med riktning nordöst som delar upp bergmassan i bergblock med för liten storlek. Dessa brantstående zoner skulle försvåra en placering av djupförvaret på denna plats. Figur 7.1-1 visar de bergblock som avgränsas av diskontinuiteter som inte får förekomma inom deponeringsblock. Figur 7.1-2 visar hur dessa block kan utnyttjas för ett mindre förvar med hänsyn till blockens bergegenskaper.

7.2 PLATSSPECIFIKA TERMISKA EGENSKAPER

7.2.1 Allmänt

Ett krav är att bentonitbarriären inte utsätts för högre temperatur än ca 130°C. Annars kan allvarlig upplösning och omvandling av bentonit till icke svällande lera ske. I praktiken behöver en säkerhetsmarginal finnas till denna temperatur och arbetet hittills har inriktats på att hålla temperaturen under 100°C vid atmosfärstryck. Med hänsyn till marginal för osäkerheter i data och beräkningar har hittills förutsatts en maximal temperatur på 80°C i bentoniten vid arbetet med layouten.



Figur 7.1-1. Blockavgränsande diskontinuiteter på 450 m nivå.

7.2.2 Bergets termiska egenskaper

De parametrar som beskriver bergets termiska egenskaper är dess ursprungliga temperatur på förvarsnivå samt dess termiska diffusivitet. Diffusiviteten i sin tur bestäms av bergets densitet, termiska konduktivitet och specifika värme.

Alla dessa parametrar är normalt enkla att mäta på bergprover eller i borrhål. Det måste dessutom fastställas hur representativa de tagna proverna är för hela bergmassan samt hur stor påverkan olika inhomogeniteter i berget har på de globala egenskaperna.

7.2.3 Bentonitbuffertens termiska egenskaper

Buffertens termiska egenskaper bestäms av dess termiska diffusivitet, som i sin tur bestäms av dess densitet, termiska konduktivitet och specifika värme. Alla dessa storheter beror av bentonitens vattenmättnadsgrad. En lägre vattenmättnad ger lägre termisk ledningsförmåga.

Bentonitbuffertens termiska egenskaper är likaså enkla att mäta och laboratoriebestämningar har gjorts som med stor noggrannhet redovisar parametervärden under olika vattenmättnadsgrader. Svårigheten här är att bestämma det vattenmättnadsförlopp som bufferten runt respektive kapsel genomgår. Detta förlopp är framför allt beroende av de hydrauliska förhållanden som råder i berget runt deponeringshålet.

Finns god tillgång på vatten torde vattenmättnaden endast ta några till högst tio år. Beräkningar av förvarets termiska utveckling kan då göras för vattenmättad bentonit. Är tillgången måttlig men ändå tillräcklig för att ge ett flöde in mot deponeringshålet kommer den ursprungliga vattenhalten inte att underskridas. Beräkningarna kan då baseras på värdena för den vattenmättnadsgrad bentoniten har vid själva deponeringstillfället. Är däremot vattentillgången dålig riskerar bentoniten att torka ut med mycket dålig värmeledningsförmåga som resultat.

Ju lägre värmeledningstal bentoniten har, desto mindre termisk effekt kan tillåtas i varje kapsel vid deponeringen för att en given temperatur i bentoniten inte ska överskridas. Ett lägre värmeledningstal leder därför till fler kapslar och en större utbredning av förvaret.

7.2.4 Erfarenheter från arbetet i Äspölaboratoriet

Bergets värmeledningsförmåga och temperatur bestämmer, givet en viss förvarslayout, vilken värmeutveckling som kan tillåtas i förvarskapslarna.

I Äspö har de olika bergarterna genomsnittliga värmeledningsförmågor mellan strax under 3,0 W/mK och upp till ca 3,7 W/mK. Bergets ursprungliga temperatur är ca 17°C.

Den generiska layouten som beskrivs i avsnitt 5.2 är baserad på en värmeledningsförmåga av 3,0 W/mK och en temperatur på 18°C. I Äspö finns alltså utrymme för en något högre värmeutveckling per kapsel. Detta har dock inte utnyttjats i den förvarsutformning som presenteras i /7.1-1/.

Betydelsen av bergets värmeledningsförmåga framgår av /7.2-1/. För samma kapsel betyder en ökning från 3,0 till 3,7 W/mK att värmeutvecklingen kan

ökas med ca 10 % eller att temperaturhöjningen på kapselns yta blir ca 10 % lägre.

Avvikelsen i bergtemperaturen på 1°C från den i den generiska layouten innebär att temperaturen på kapselns yta kan tillåtas öka ytterligare 1°C. Detta svarar mot ytterligare ca 1,5 % större värmeutveckling i kapslarna.

Bergets struktur vad gäller de sprickmönster som har betydelse för vattenföringen in till deponeringshålen, har inte studerats i detalj på Äspö. Den bedömning som idag kan göras är att den mängd vatten som finns närvarande från början i bufferten och i spalterna i deponeringshålet stannar kvar i deponeringshålet i stället för att drivas ut i närberget /7.2-2/. Bufferten torkar alltså inte ut utan ökar istället sin vattenkvot tills full vattenmättnad nås. Detta betyder att buffertens värmeledningsförmåga kan antas ligga på 1,0 W/mK från början /7.2-3/ och sedan öka. Samtidigt kan god termisk kontakt antas finnas mellan kapsel och buffert respektive buffert och berg genom den vattenkontakt som hela tiden finns.

7.3 EFFEKTER PÅ NÄRBERGETS EGENSKAPER

7.3.1 Allmänt

Berget i väggar, tak och golv runt schakt, tunnlar och bergrum kommer att påverkas av själva utsprängningen och borrning av deponeringshål. I närheten av kapslar med värmegenererande använt bränsle kommer detta att ske även till följd av uppvärmning/avkylning. Påverkan är beroende av såväl ursprungliga geologiska förhållanden som bergbrytningsmetod och värmebelastning.

I det följande beskrivs de egenskaper närfältberget bedöms få under förutsättning att deponeringshålen fullprofilborras och deponeringstunnlarna borras och sprängs på konventionellt sätt (försiktig sprängning). Även effekterna av värmeutvecklingen i deponerade kapslarna beskrivs kortfattat.

7.3.2 Påverkan vid fullprofilborring av deponeringshål

Fullprofilborringen av de ca 1,75 m vida deponeringshålen ger en mycket begränsad påverkan på omgivande berg. De nya sprickor som utbildas torde på sin höjd kunna sträcka sig 100 mm in i sidoberget /7.3-1/. Dessutom tillkommer den elasto-plastiska förändring som närfältberget undergår till följd av spänningsomlagringen. Experimentborringen av 1,52 m vida hål i Olkiluoto /7.3-2/ visar att en förändring i form av förhöjd porositet i berget kan skönjas in till ett djup av ca 20 mm från hålväggen. I Grimsel, Schweiz, togs kärnor i väggen på en TBM-tunnel på 1000 m djup. I dessa kunde förändringar noteras in till ett djup på 10–30 mm från tunnelväggen /7.3-3/.

De slutsatser som hittills dragits är alltså att en mindre zon utbildas närmast bergväggen som kan ha en förhöjd vattenledningsförmåga i hålets höjdriktning. Detta är bra för vattenmättnaden av bufferten då en jämn fördelning av vatten längs hela deponeringshålets höjd skulle kunna förutsättas.

7.3.3 Påverkan vid sprängning av tunnlar

Sprängning av deponeringstunnlarna, liksom övriga tunnlar, åstadkommer betydligt större skador i berget än mekaniserad brytning såsom fullprofilborrning. Sprängskadeförsöket i Äspörampen /7.3-4/, liksom i ZEDEX-tunneln /7.3-5/, bekräftar de preliminära uppskattningar som gjordes i Stripaprojektet /7.3-6/ samt de skadeverkningar som bestämts på teoretisk grund /7.3-7/. Slutsatserna från försöket i Äspörampen indikerar att man behöver räkna med en 0,3 m zon i väggar och tak och en 1,0–1,5 m zon i golvet som är betydligt påverkade. Spänningsomlagringen leder till förändringar, om än av mindre allvarlig art längre ut från tunneln. I /7.3-8/ görs bedömningen att den hydrauliska konduktiviteten ökar med 100-1000 gånger i den sprängstörda zonen (i genomsnitt 100 gånger i en 1 m mäktig zon) och ca 10 gånger i den spänningsomlagrade zonen utanför (en tunneldiameter ut). Få mätningar finns emellertid som bekräftar denna bedömning. Vissa resultat pekar i stället på att hydrauliskt sammanbundna strukturer endast har en utsträckning av någon eller några meter /7.3-9/.

7.3.4 Påverkan av uppvärmning

Uppvärmningen påverkar berget genom att spänningarna ökar. Ökningen är dock inte så stor att det homogena bergets hållfasthet överskrids på 400–700 m djup. Eftersom bentoniten i deponeringshålet utövar ett tryck på bergväggen är möjligheten till rörelser längs sprickplan liten. Efter avsvälning har de termoinducerade spänningarna klingat ut, och deponeringshålen förutsätts ha återfått de ursprungliga egenskaperna i närfältberget.

7.4 BYGGNADSMATERIAL

7.4.1 Åtgång av byggnadsmaterial

Verksamheten under jord kommer att medföra att olika material blir kvar efter pluggning och förslutning. Det gäller dels avsiktligt inplacerat material som kapslar och bentonit, cement och järn för injektering, sprutbetong, bergbultning och annan förstärkning, dels rester av ämnen som använts för att genomföra arbetet, driva maskiner etc. Dessa rester kan bli kvar till följd av små, kontinuerliga eller större, okontrollerade utsläpp. En bedömning av materialmängder som behövs för injektering och bergförstärkning under Äspöförhållanden finns redovisad i tabell 7.4-1 /7.4-1/.

Cement och järn används här som samlingsbegrepp. Den kemiska sammansättningen kan variera, i viss mån efter önskemål om minimering av vissa ämnen.

7.4.2 Annat material som kan bli kvar i djupförvaret

Arbete pågår med att kvantifiera hur stora mängder av annat material än cement och järn, som kan bli kvar. Utgångspunkt är här den kunskap som finns om vilka ämnen som hanteras under jord och hur de hanteras. Även bedöm-

ningar av hur materialbalansen kan se ut mellan sådant som tas ner under jord och sådant som tas upp till markytan igen vägs in. Eftersom inga mätningar på arbetsplatser finns blir uppgifterna osäkra. En preliminär uppskattning av olika kvantiteter finns i /7.4-2/.

Tabell 7.4-1. En grov bedömning av materialmängder för injektering och bergförstärkning i djupförvaret under Äspöförhållanden. Endast cement- respektive järninnehåll i använda byggmaterial anges. Förstärkningsåtgärder dimensioneras för 50 års livslängd.

Byggnadsområde	Cement (ton)	Järn (ton)
Konventionell tunneldrivning		
Nedfartsramp	1 700	100
Centralområde	900	100
Område för annat långlivat avfall	1 000	50
Område för använt kärnbränsle – Steg 1		
– Driftgata	1 600	70
– Deponeringstunnlar	200	20
Område för använt kärnbränsle – Steg 2		
– Driftgator	3 300	150
– Deponeringstunnlar	2 000	200
SUMMA AVRUNDAT	11 000	700
Tunneldrivning med TBM		
Nedfartsramp	800	50
Centralområde	900	80
Område för annat långlivat avfall	1 000	50
Område för använt kärnbränsle – Steg 1		
– Driftgata	700	30
– Deponeringstunnlar	100	5
Område för använt kärnbränsle – Steg 2		
– Driftgator	1 400	60
– Deponeringstunnlar	1 000	30
SUMMA AVRUNDAT	6 000	300

8 BIOSFÄREN

I kapitlet redovisas den valda förvarsplatsens biosfär med fokus på faktorer av betydelse för spridning av radionuklider.

Baserat på data från den geovetenskapliga och hydrologiska karakteriseringen av platsen beskrivs grundvattenrecipienter och spridningsvägar i förvarets omgivning. Likaså diskuteras plats- och regionspecifikt utnyttjande av naturen och överföringsvägar till människan. Eventuella platsspecifika spridningsmodeller redovisas.

En specifik karakterisering av biosfären kan behöva göras som underlag till analyserna av eventuella radiologiska konsekvenser för andra organismer än människan.

Osäkerheterna diskuteras, främst mot bakgrund av ekosystemens höga potential till förändring med tiden, och med hänsyn till de platsspecifika faktorer som kan begränsa föränderligheten.

I denna rapport utgör kapitel 8 en allmän beskrivning av biosfärens roll i transporten av radionuklider från berggrunden till människans omgivning. Landhöjning och andra förändringar i biosfären sker under relativt korta tidsrymder och dagens platsspecifika förhållanden behöver inte vara representativa för biosfären vid ett eventuellt utsläpp nära markytan. I stället utgör kapitel 8 en genomgång av samtliga recipienttyper som kan bli aktuella.

Biosfärens initierade recipient av det djupa grundvattnet avgör i hög grad vilka spridningsvägar för ev radionuklider som blir aktuella. Normalt betraktas en brunn som det ogynnsammaste scenariet varför den i texten ges en mer kvantifierad beskrivning. Någon motsvarande genomgång av recipienternas betydelse för andra organismer än människan har inte gjorts.

8.1 INLEDNING

Säkerhetsanalysens syfte kan sägas vara att visa att konsekvenserna för mänskliga och miljö av rimliga framtida utvecklingar av ett djupförvar ligger inom acceptabla gränser. För att bedöma dessa konsekvenser behöver biosfären kring den aktuella förvarsplatsen beskrivas. Beskrivningen ska innehålla bl a uppgifter om biosfärens recipienter för djupt grundvatten och om de lokala ekosystemen. Även människans utnyttjande av naturen ska ingå i beskrivningen.

Eftersom biosfären förväntas genomgå förändringar under den tid analysen behandlar behöver inte bara dagens biosfär på förvarsplatsen analyseras utan också tänkbara framtida variationer. Därför blir detta kapitel mer generellt till sin karaktär än den geologiska beskrivningen av förvarsplatsen i kapitel 6.

I det följande beskrivs i generella termer olika biosfärsrecipienter för djupt grundvatten och människans utnyttjande av naturen. Korta diskussioner om

skyddsvärda arter och miljöer samt om tidsberodande förändringar av biosfären avslutar kapitlet.

8.2 BIOSFÄRENS RECIPIENTER

De radionuklider som kan komma att frigöras från ett djupförvar transporteras med grundvattnet och kan så småningom komma i kontakt med biosfären via vattendrag, sjöar, hav och brunnar. Grundvattnet kan även tränga upp genom sediment, torvmossar eller jordar om dessa är utströmningsområden. Undantagsvis kan radionuklider transporteras genom berget via gas.

En eventuell frigörelse av radionuklider från ett förvar kommer sannolikt att starta först många år efter förslutning. Även transporten från förvaret till biosfären tar lång tid. Detta innebär att eventuella utsläpp i biosfären sker i ekosystem tusentals år in i framtiden, då landskapet sannolikt genomgått stora förändringar. Frigörelsen av radionuklider kan antas pågå under mycket lång tid, vilket gör att landskapet hinner förändras ytterligare. Sjösediment kan t ex börja brukas som lantbruksmark. Dessa förändringar kan bero på klimat (ändring av havsnivå, eutrofiering m m), eller på mänsklig påverkan som dränering eller muddring av sjöar och vattendrag.

Transporten i övergången mellan geosfär och biosfär är ofta svår att modellera eftersom kemiska och andra förhållanden i vattnet och omgivande media förändras kraftigt inom ett litet övergångsområde. Ett låghaltigt utsläpp av radionuklider kan passera en zon där nukliderna fälls ut och koncentreras under lång tid. Om egenskaperna hos denna zon förändras kan radionukliderna frigöras under en kortare period. Ett exempel är anrikningen av uran i botten på torvmossar vilket teoretiskt kan leda till ett stort utsläpp under kort tid om torven bränns, brukas eller eroderas.

Konsekvenserna av ett utsläpp är starkt beroende av om och hur radionukliderna når människan. Detta kan ske via en dricksvattenbrunn, ett vattendrag, en insjö, via havsvatten eller via jordbruksprodukter och andra livsmedel.

Vattendrag

Vattendrag som diken, bäckar, åar och floder är exempel på recipienter där radionukliderna späds ut relativt snabbt och innan de når människan. De processer som är viktiga är i huvudsak samma som för en brunn, se nedan, med skillnaden att bevattning får en relativt större betydelse för vattendragen. Muddring av vattendrag utgör en viktig länk mellan grundvatten och jordbruksmark. Förtäring av fisk och skaldjur samt bad är också möjliga exponeringsvägar.

Sjöar

I sjöar kommer radionukliderna att spädas ut ytterligare innan de når människan. Fisk och skaldjur, övriga vattenkulturer, samt bad har större betydelse än i vattendragen. Extern exponering på stränder är en ytterligare exponeringsväg.

Uppodling av sjöars bottensediment efter landhöjning, eutrofiering eller uttorkning har utretts /8.2-1/ med resultatet att denna utveckling skulle kunna ge upp till 10 gånger större dos jämfört med om sjön inte skulle förändras.

Hav

Om radionukliderna når biosfären via världshaven eller Östersjön blir doserna till kritisk grupp endast några promille av de som fås vid motsvarande inlandsutsläpp. Dos erhålls i dessa fall främst från fisk. Anledning till den stora skillnaden är främst olikheterna i exponeringsvägar och de mycket långa uppehållstiderna i sediment, som gör att nukliderna antingen bortförs ur systemen eller hinner avklinga. Även den snabbare utspädningen i haven bidrar till skillnaden.

Brunnar

En dricksvattenbrunn utgör en kortslutning mellan geosfär och biosfär. Transporttiderna förkortas i övre delen av geosfären, och utspädningen kan bli väsentligt mindre än i stora vattenvolymer som sjöar, vattendrag eller ytliga grundvattenmagasin. En brunn är en recipient vars utnyttjande kan ge jämförelsevis stora doskonverteringsfaktorer. Därför diskuteras olika situationer kring brunnar något mer utförligt nedan. Brunnar behandlas oftast som särskilda scenarier i säkerhetsanalyser.

Dos till människa från radionuklider i en brunn påverkas mer av hur brunnens vatten används än av hur mycket vatten som pumpas upp. En stor brunn kan förväntas dra till sig en något större del av ett eventuellt utsläpp från ett förvar, men det kompenseras normalt av att bara en liten del av vattnet då används till dricksvatten. Vattenuttaget kan variera från någon $\text{m}^3/\text{år}$ till flera tusen $\text{m}^3/\text{år}$.

Grundvattenflöden på ca 500 m djup i berget är av storleksordningen 3 liter/ $(\text{m}^2 \cdot \text{år})$. Ytan hos en förvarskapsel är ca 9 m^2 , vilket medför att den minsta volym som rimligen kan innehålla hela mängden läckande radionuklider från **en** kapsel är några tiotal liter/år. Motsvarande volym från hela förvaret med 5 300 kapslar på 1 km^2 yta blir ca $3\,000 \text{ m}^3/\text{år}$.

Ett extremt ogynnsamt fall skulle vara en liten brunn (några $\text{m}^3/\text{år}$) som används enbart för dricksvatten och som mottar alla nuklider från en kapsel som råkar vara defekt och dessutom läcker just under de år brunnen existerar. Detta är det enda fall man kunnat förutse där alla utsläppta nuklider från en kapsel konsumeras som dricksvatten.

Om utsläppet från flera kapslar skulle komma till samma brunn, förutsätter detta att så mycket vatten pumpas upp att det troligen används även till annat än dricksvatten.

Av ovanstående framgår att det är sannolikt att allt grundvatten från förvarsområdet kring **en enskild kapsel** skulle kunna nå en och samma brunn, även om denna är relativt liten. Däremot är det inte realistiskt att hela innehållet av radionuklider från ett utsläpp från ett antal kapslar spridda över hela förvaret kommer till en och samma brunn. En brunn som fångar grundvatten från hela förvaret skulle behöva ha ett vattenuttag av flera tusen $\text{m}^3/\text{år}$ av enbart det vatten som rinner genom förvarsområdet, vilket är högst orealistiskt. Ett specifikt scenario, ”stylized well”, beskrivs i /8.2-2/.

Atmosfär

Gasutsläpp från förvaret kommer, då de når biosfären, relativt snabbt att distribueras runt den norra hemisfären. Transporttiden från förvar till atmosfär kan antas vara större än tiden för den vidare distributionen runt hemisfären.

8.3 MÄNNISKANS UTNYTTJANDE AV NATUREN

En rad olika scenarier kan naturligtvis tänkas för människans framtida utnyttjande av naturen på en given plats. Ett generellt scenario som ger jämförelsevis stora dosfaktorer utgörs av ett mindre lantbruk med stor andel lokal produktion. I detta scenario påverkar människan naturen avsevärt genom jord- och skogsbruk. Val av parametrar som i modellen beskriver konsumtion, bevattning, djurhållning m m baseras vanligen på **dagens biosfär**. Trots att avvikelserna från dagens situation torde vara avsevärda vid den tidpunkt då radionuklider kan tänkas nå biosfären, är detta det enda system som kan beskrivas med rimlig precision.

För andra scenarier är det ytterst fantasin som sätter gränsen för hur människan kan tänkas utnyttja och påverka naturen. Gränsen mellan normal verksamhet och speciella scenarier kan i vissa fall vara svår att dra. Exempel på sådana fall är stadsbyggnation, nyutveckling i jord- och skogsbruk samt vattenbruk.

8.4 SKYDDSVÄRDA ARTER OCH MILJÖER

De åtgärder som vidtas för att skydda människor långt in i framtiden bör stå i balans med vad som görs för att skydda resten av det levande i vår värld. Det viktiga är då inte att skydda individer, utan snarare populationer och arter och framför allt funktionen i ekosystemen. Detta kan vara människans eller någon annan arts habitat, som måste kunna försörja arten även i framtiden.

8.5 TIDSBEROENDE FÖRÄNDRINGAR

Den bortre tidsgränsen för försöken att förutsäga förändringar i biosfären brukar i säkerhetsanalyser sättas till inledningen av nästa istid, dvs mellan 5 000 och 10 000 år in i framtiden.

Innan nästa istid kan bl.a. landhöjningar, ändring av havsnivå och klimat, diverse antropogena miljöeffekter och bruk av ny teknik förväntas. Det kan ofta vara svårt att i generella termer förutsäga vilka effekter detta kan ha i biosfären vad gäller spridning och intag av nuklider och framför allt de risker det kan vara förknippat med. Med god kännedom om förhållandena vid en specifik plats är det däremot ofta möjligt att göra relativt långtgående förutsägelser om tidsberoende förändringar i biosfären samt att analysera konsekvenserna av dessa.

9 ANALYS – FÖRVARSSYSTEMET, SCENARIER

Kapitlet inleds med en översikt av förvaret och dess funktion. Därefter följer en genomgång av förvarets barriärer, de tidsberoende processer som kan förekomma i förvaret, eller mellan förvaret och dess omgivning, och den därav föranledda utveckling över tiden.

Den i säkerhetsanalysen tillämpade scenariemetodiken redovisas. Resultaterande interaktionsmatriser och dokumentationsuppläggning presenteras och diskuteras

Valet av scenarier och hur scenarierna behandlas i säkerhetsanalysen går igenom. Slutligen diskuteras osäkerheter och fullständighet i scenariearbetet.

I denna rapport utgör kapitel 9 en lägesredovisning av det scenariearbete som pågår för SR-I. Genomgången av de olika stegen i arbetet är relativt detaljerad för att visa på olika frågeställningar som dyker upp i det praktiska arbetet. RES-metodiken som presenterades i avsnitt 3 har utnyttjats för att skapa interaktionsmatriser för närzonen, fjärrzonen och biosfären. Närzonsmatrisen har detaljerats i en bränslematris och en buffertmatris. Dessa matriser kommer att revideras allt eftersom förutsättningarna justeras. Biosfärmatrisen är resultatet av ett internationellt samarbete inom BIOMOV2. I avsnitt 9.4 har ett antal scenarier grupperats i tabeller efter den initierande händelsens karaktär. Även dessa tabeller kan komma att revideras under SR-I analysernas gång.

9.1 FÖRVARETS AVSEDDA FUNKTION

Förvaret ska isolera det radioaktiva avfallet under den tid det har en väsentligt förhöjd aktivitet jämfört med sin omgivning. För att uppnå en hög grad av säkerhet är systemet uppbyggt av flera självständiga barriärer, den s k flerbarriärsprincipen. Enligt flerbarriärsprincipen ska hela systemets säkerhet inte vara beroende av funktionen hos en enstaka barriär. Barriärerna har sådana egenskaper att de på olika sätt hindrar radionukliderna att nå biosfär och människa. Barriärerna förhindrar upplösning, stänger inne radionukliderna, buffrar, filtrerar samt bidrar till långsam transport av radionuklider. Barriärerna kan delas in i tekniska, dvs konstruerade av människan, och naturliga. Tillsammans bildar barriärerna ett redundant system för att isolera avfallet under den tid då en förhöjd aktivitet finns.

Vid säkerhetsanalyser brukar det analyserade systemet delas in i närzon, fjärrzon och biosfär. Närzonen omfattar de tekniska barriärerna. Dessa är bränslet, kapseln med stålinsats och kopparhölje, samt bufferten av bentonit. Tunnelfyllningar samt den del av berget som påverkats av byggandet av förvaret tillhör också närzonen. Fjärrzonen omfattar berget i övrigt. Med biosfären avses miljön på ytan i förvarets omgivning. Nedan beskrivs de olika delarna, deras barriärfunktioner, utveckling över tiden, samt för biosfären inverkan på över-

FÖRVARSSYSTEMET

A. BIOSFÄREN

- Överföring av radionuklider till människor via recipienter för djupt grundvatten och lokala ekosystem.
- Utspädningsförhållanden, recipienters förmåga att buffra, lagra eller ackumulera radionuklider samt mark- och vattenanvändning påverkar stråldosen till miljö och människor.
- Genom att välja en plats med gynnsamma förhållanden kan stråldosen begränsas.

B. BERGET

- Berget ger de tekniska barriärerna en stabil miljö såväl kemiskt som mekaniskt.
- Om de tekniska barriärerna skadats;
 - fördröjer transport av radionuklider genom långsamt vattenflöde och därmed långa transporttider,
 - håller kvar radionuklider genom att fungera som filter och buffert.

C. BUFFERTEN

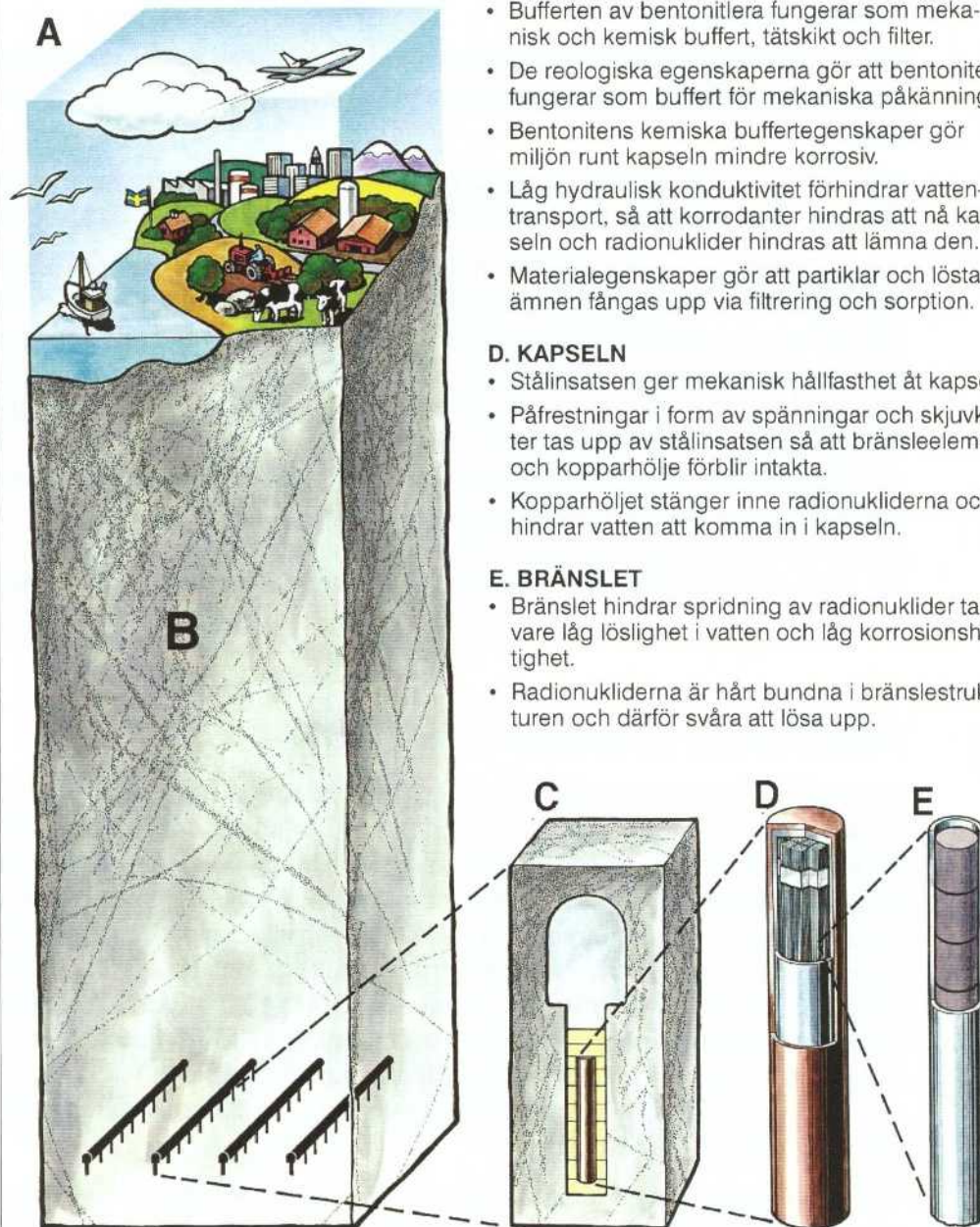
- Bufferten av bentonitlera fungerar som mekanisk och kemisk buffert, tätskikt och filter.
- De reologiska egenskaperna gör att bentoniten fungerar som buffert för mekaniska påkänningar.
- Bentonitens kemiska buffertegenskaper gör miljön runt kapseln mindre korrosiv.
- Låg hydraulisk konduktivitet förhindrar vatten-transport, så att korroderingar hindras att nå kapseln och radionuklider hindras att lämna den.
- Materialegenskaper gör att partiklar och lösta ämnen fångas upp via filtrering och sorption.

D. KAPSELN

- Stålsatsen ger mekanisk hållfasthet åt kapseln.
- Påfrestningar i form av spänningar och skjuvkrafter tas upp av stålsatsen så att bränsleelement och kopparhölje förblir intakta.
- Kopparhöljet stänger inne radionukliderna och hindrar vatten att komma in i kapseln.

E. BRÄNSLET

- Bränslet hindrar spridning av radionuklider tack vare låg löslighet i vatten och låg korrosionshastighet.
- Radionukliderna är hårt bundna i bränslestrukturen och därför svåra att lösa upp.



Figur 9.1-1. Det analyserade systemets olika delar. De olika barriärernas funktion samt biosfärens inverkan på överföringen av radionuklider till människor.