

Djupförvar för använt kärnbränsle

SR 97 – Säkerheten efter förslutning

November 1999

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co
Box 5864

SE-102 40 Stockholm Sweden

Tel 08-459 84 00
+46 8 459 84 00

Fax 08-661 57 19
+46 8 661 57 19



Djupförvar för använt kärnbränsle

**SR 97 – Säkerheten
efter förslutning**

November 1999

Förord

SKB har de senaste tre åren genomfört en analys av den långsiktiga säkerheten för ett djupförvar för använt kärnbränsle. Projektet avrapporteras härmed under titeln "Djupförvar för använt kärnbränsle; SR 97 - Säkerheten efter förslutning". Huvudrapporten i dess fullständiga form består av två delar med redogörelser för förutsättningar, metodik, analyser, resultat och slutsatser. Dessutom finns en fyllig sammanfattning som bl a innehåller hela slutsatskapitlet från den fullständiga versionen.

Rapporten är i första hand skriven för experter vilket inte hindrar att delar av texten bör vara givande också för ickespecialister.

Allan Hedin har svarat för metodik och för samordning av projektets olika delar, skrivit sammanfattningen och fungerat som skrivande redaktör för den fullständiga huvudrapporten. Patrik Sellin har handlagt närområdesfrågor. Anders Ström och Jan-Olof Selroos har svarat för geosfärsfrågor och Ulrik Kautsky för biosfären. Lena Morén har arbetat med klimat- och intrångsscenarierna och Fredrik Lindström har genomfört beräkningarna av radionuklidtransport.

Många andra personer inom SKB och i omvärlden har på olika sätt bidragit till projektet. Om några få ska framhållas faller det svåra valet på Johan Andersson, Golder Grundteknik, som medverkat som expert på både geosfärsfrågor och säkerhetsanalys i allmänhet och på Harald Hökmark, Clay Technology, som arbetat med mekaniska frågor i geosfären.

SKB svarar ensamt för alla bedömningar och slutsatser i rapporten.

Stockholm i november 1999



Tönis Papp
Chef Säkerhet och Vetenskap

Innehåll

| | |
|--|----|
| Sammanfattning | 7 |
| 1 Förutsättningar | 11 |
| 1.1 Varför SR 97? | 11 |
| 1.2 Syften | 12 |
| 1.3 Avgränsningar | 13 |
| 1.4 Rapportstruktur | 14 |
| 1.5 Acceptanskriterier | 15 |
| 1.5.1 SSI:s föreskrifter för ett slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle | 15 |
| 1.5.2 SKI:s remissversion av föreskrifter för säkerhet vid slutförvaring av kärnavfall | 17 |
| 1.6 Säkerhetsprinciper | 17 |
| 1.7 Tidsperspektiv | 18 |
| 1.7.1 Tidsperioder i SR 97 | 19 |
| 1.8 Metodik | 19 |
| 1.8.1 Vad är en säkerhetsanalys? | 19 |
| 1.8.2 Hantering av osäkerheter | 20 |
| 2 Systembeskrivning/initialtillstånd | 23 |
| 2.1 Metodik | 24 |
| 2.1.1 Systembeskrivning på THMC-format | 24 |
| 2.2 Bränsle | 25 |
| 2.3 Gjutjärnsinsats/kopparkapsel | 27 |
| 2.4 Buffert/återfyllning | 27 |
| 2.5 Geosfär/platsbeskrivningar | 28 |
| 2.5.1 Kristallint berg | 28 |
| 2.5.2 De tre platserna i SR 97 | 29 |
| 2.5.3 Platsanpassade förvarsutformningar | 32 |
| 2.5.4 THMC-beskrivning av processer och variabler | 34 |
| 2.6 Säkerhetskriterier | 34 |
| 2.7 Fullständigheten i systembeskrivningen | 35 |
| 3 Scenarier | 37 |
| 3.1 Val av scenarier | 37 |
| 3.1.1 Fullständighet/täckningsgrad i scenariovalet | 39 |
| 3.2 Basscenario | 40 |
| 3.2.1 Initialtillstånd och randförhållanden | 40 |
| 3.2.2 Överblick av processer och beroenden | 41 |
| 3.2.3 Strålrelaterad utveckling | 42 |
| 3.2.4 Termisk utveckling | 44 |
| 3.2.5 Hydraulisk utveckling | 46 |
| 3.2.6 Mekanisk utveckling | 48 |
| 3.2.7 Kemisk utveckling | 51 |
| 3.2.8 Sammanfattning: Basscenarioet i ett tidsperspektiv | 54 |
| 3.2.9 Övergripande slutsatser | 56 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.3 | Kapseldefektscenario | 57 |
| 3.3.1 | Initiala kapselskador | 58 |
| 3.3.2 | Strålrelaterad utveckling, kriticitet | 58 |
| 3.3.3 | Hydromekanisk utveckling i defekt kapsel | 60 |
| 3.3.4 | Kemisk utveckling i defekt kapsel | 63 |
| 3.3.5 | Hydraulisk utveckling i geosfären | 66 |
| 3.3.6 | Transportprocesser i förvaret | 71 |
| 3.3.7 | Biosfären | 71 |
| 3.3.8 | Beräkningar av radionuklidtransport | 74 |
| 3.3.9 | Resultatdiskussion | 84 |
| 3.4 | Klimatscenario | 87 |
| 3.4.1 | Klimatscenario i SR 97 | 88 |
| 3.4.2 | Påverkan på förvaret | 89 |
| 3.4.3 | Termisk utveckling | 89 |
| 3.4.4 | Hydraulisk utveckling | 90 |
| 3.4.5 | Mekanisk utveckling | 90 |
| 3.4.6 | Kemisk utveckling | 90 |
| 3.4.7 | Radionuklidtransport | 91 |
| 3.4.8 | Sammanfattning | 92 |
| 3.4.9 | Osäkerheter | 92 |
| 3.5 | Jordskalvsscenario | 93 |
| 3.5.1 | Bakgrund | 93 |
| 3.5.2 | Analys av jordskalvsrisker | 94 |
| 3.5.3 | Osäkerheter | 95 |
| 3.5.4 | Slutsatser | 96 |
| 3.6 | Intrångsscenario | 96 |
| 4 | Diskussion och slutsatser | 99 |
| 4.1 | KBS-3-metodens säkerhet i svensk berggrund | 99 |
| 4.1.1 | Är alla inre processer och yttre skeenden av vikt identifierade? | 100 |
| 4.1.2 | Vilket är resultatet av de olika scenarioanalyserna och vilken tilltro kan resultaten tillmätas? | 100 |
| 4.1.3 | Sammanvägning av scenarioanalyserna | 104 |
| 4.1.4 | Hur påverkar olika förhållanden i svensk berggrund möjligheterna att bygga ett säkert djupförvar? | 105 |
| 4.2 | Metodik för säkerhetsanalys | 107 |
| 4.2.1 | Systembeskrivning | 108 |
| 4.2.2 | Val av scenarier | 108 |
| 4.2.3 | Analys av valda scenarier | 109 |
| 4.2.4 | Hantering av osäkerheter | 109 |
| 4.2.5 | Bedömning av tillgänglig metodik | 110 |
| 4.3 | Underlag för platsval och platsundersökningar | 110 |
| 4.3.1 | Vilka krav ställer djupförvaret på berget? | 110 |
| 4.3.2 | Program för platsundersökningar | 111 |
| 4.4 | Underlag för funktionskrav | 112 |
| 4.5 | Prioritering av forskning | 113 |
| 4.6 | Slutord | 114 |

Sammanfattning

Syfte och förutsättningar

Inför kommande platsundersökningar för lokalisering av ett djupförvar för använt kärnbränsle har regering och myndigheter begärt en analys av förvarets långsiktiga säkerhet med syftet "...att göra troligt att KBS-3-metoden har goda förutsättningar att uppfylla de säkerhets- och strålskydds krav som SKI och SSI preciserat de senaste åren".

Säkerhetsanalysen SR 97 utgör den begärda redovisningen. Syftet är att med en systematiskt genomförd analys visa huruvida risken för skadeverkningar hos individer i förvarets närhet uppfyller svenska myndigheters acceptanskriterier dvs att risken inte får överstiga 10^{-6} per år. Geologiska data hämtas från tre platser i Sverige för att belysa olika förhållanden i svensk granitisk berggrund. Förvaret är av KBS-3-typ där bränslet placeras i isolerande kopparkapslar med en hållfast gjutjärnsinsats. Kapslarna omges av bentonitlera i enskilda deponeringshål på 500 meters djup i granitisk berggrund.

Analysen gäller ett förslutet förvar för använt kärnbränsle och omfattar således varken säkerheten under drift eller säkerheten hos förvaret för långlivat låg- och medelaktivt avfall. Dessa frågor hanteras i separata redovisningar.

Metodik

Metodiken i analysen innebär att först beskriva förvarets utseende då det just förslutits och därefter analysera systemets förändring i tiden till följd av dels inre processer i förvaret, dels yttre påverkan. Förvarssystemets framtida utveckling analyseras som fem scenarier. Det första är ett basscenario där förvaret tänkts vara byggt helt enligt specifikationer och där dagens förhållanden i omgivning, bl a klimatet, tänks bestå. I de fyra övriga scenarierna visas hur utvecklingen skiljer sig från den i basscenariot om förvaret innehåller ett fåtal initialt defekta kapslar, vid klimatförändringar, vid jordskalv och vid framtida oavsiktliga mänskliga intrång. Utvecklingen studeras som termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska delutvecklingar och syftet med analyserna är ytterst att utreda förvarets förmåga att dels isolera avfallet med hjälp av kapslarna, dels fördröja ett eventuellt utsläpp av radionuklider om kapslar skadas. Tidsperspektivet för analyserna är som längst en miljon år i enlighet med preliminära föreskrifter.

Basscenario

I basscenariot analyseras med modellstudier och beräkningar hur bränslets farlighet avtar med tiden, förvarets termiska utveckling till följd av resteffekten i bränslet, den hydrauliska utvecklingen i buffert och återfyllning då dessa vattenmättas och det långsiktiga grundvattenflödet i geosfären vid de tre platserna.

Mekaniska påfrestningar på kapseln till följd av grundvattentryck och svälltryck från bufferten utreds liksom geosfärens långsiktiga mekaniska stabilitet. Den kemiska utvecklingen i berggrund och buffert samt korrosion av kopparkapseln analyseras.

Den övergripande slutsatsen av analyserna i basscenariot är att kopparkapseln isolerande förmåga inte hotas av vare sig de mekaniska eller kemiska påfrestningar den utsätts för. Säkerhetsmarginalerna är stora även i ett miljonårsperspektiv.

Kapseldefektscenariot

I kapseldefektscenariot analyseras den inre utvecklingen i initialt defekta kapslar och den radionuklidspredning som kan bli följden i buffert, geosfär och biosfär. Resultatet blir uppskattningar av dos och risk som kan jämföras med acceptanskriteriet för ett djupförvar.

I scenariot visas först att kriticitet inte förväntas uppkomma i förvaret.

Analys av den hydromekaniska utvecklingen i en skadad kapsel då vatten tränger in visar att även den skadade kapseln hindrar frigörelsen av radionuklider under mycket lång tid eftersom inträngande vatten förbrukas genom korrosion av gjutjärnsinsatsen.

I analys av den kemiska utvecklingen i en skadad kapsel studeras bl a upplösning av bränslet och löslighetsförhållanden för radionuklider som frigörs från bränslet. Med modellberäkningar visas att vätgas från korrosion av gjutjärnsinsatsen bidrar till att hålla hastigheten för bränsleupplösning låg.

Grundvattenströmning studeras i lokal skala vid de tre platserna. Analyserna visar att spridningen i resultat till följd av den naturliga variabiliteten i berget ofta överskuggar spridning orsakad av både skillnader mellan olika modellkoncept och osäkerheter i randvillkor, sprickstruktur etc.

Radionuklidomsättning i biosfären modelleras för en rad system, bl a brunn och torvmark. Torvmarken ger förhållandevis höga doser till följd av ackumulation av bl a Ra-226.

Data från de ovannämnda studierna används därefter för beräkningar av radionuklidtransport i kapsel, buffert, återfyllning och geosfär. Utsläpp från geosfären omräknas till doser i olika ekosystem. För alla indata till beräkningarna uppskattas såväl rimliga som pessimistiska värden och i ett fåtal fall även statistiska fördelningar.

Med rimliga data ligger doserna vid samtliga platser långt under de dosgränser som kan härledas ur myndigheternas acceptanskriterier. Inverkan av osäkerheter i data analyseras genom att systematiskt byta rimliga data mot pessimistiska och studera beräkningsresultatet. Spridningen i flödesrelaterade data i geosfären har den största inverkan på resultatet, följt av dataosäkerheter för biosfären. Andra slutsatser är att förståelsen för bränsleupplösning behöver förbättras samt att sannolikhet och storlek hos initiala kapselskador som undgår kvalitetskontroll är idag svåra att bedöma.

För att få ett riskmått som direkt kan jämföras med acceptanskriteriet görs också riskanalyser i form av förenklade probabilistiska beräkningar. Riskanalyserna visar att samtliga platser ligger väl under acceptanskriteriet. För utsläpp till en brunn blir den maximala risken aldrig mer än 5 promille av acceptanskriteriet även då beräkningarna utsträcks en miljon år framåt i tiden. Detsamma gäller utsläpp till torvmark för tider upp till 100 000 år medan den maximala risken här växer till cirka en tiondel av acceptanskriteriet vid den minst gynnsamma platsen för tider efter 100 000 år.

Klimatscenariot

I klimatscenariot utreds konsekvenserna av framtida klimatförändringar. Dagens klimat är i ett historiskt perspektiv förhållandevis varmt och framtida förändringar förväntas till övervägande delen ge kallare klimat till följd av cykliska variationer i solinstrålningen. En tänkbar utveckling vid var och en av de tre platserna skisseras för de kommande 150 000 åren. Utvecklingen omfattar bl a en kraftig glaciation (nedisning).

Förvarssystemets termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska utveckling vid de förändrade förhållandena i omgivningen studeras i form av en jämförelse med utvecklingen i basscenariot.

Även i klimatscenariot är den övergripande slutsatsen att kopparkapselns isolerande förmåga inte hotas av vare sig mekaniska eller kemiska påfrestningar. De mekaniska påfrestningarna blir större än i basscenariot framför allt på grund av högre berg- och grundvattentryck vid en glaciation. De kemiska påfrestningarna blir ungefär desamma, bl a eftersom syrehaltigt grundvatten inte förväntas nå kapseln. Hållfasthetsberäkningarna för kapseln kan behöva förfinas med mer realistiska, inhomogena materialegenskaper och förståelsen för buffererosion vid extremt jonfattiga grundvattensammansättningar kan behöva utredas ytterligare.

Vad gäller förvarets fördröjande förmåga, t ex vid initiala kapselskador, sker de viktigaste förändringarna i biosfären. Förvarsplatserna förväntas vara täckta av inlandsis eller hav under långa perioder och den samlade effekten av klimatförändringar blir därför att doskonsekvenserna minskar i jämförelse med en situation där dagens klimat består.

Jordskalvsscenario

I jordskalvsscenarioet analyseras konsekvenserna av jordskalv med modellstudier där platsspecifika data används för geosfärens struktur och för jordskalvsstatistik. Analysmetoden är ny och innehåller flera kraftigt pessimistiska förenklingar. Analyserna visar att sannolikheten för kapselskador är jämförbar med den som antas för initiala skador i kapseldefektscenariot. I utvärderingen av analysmetoden visas hur mindre pessimistiska antaganden bör kunna leda till att inga kapselskador alls uppkommer i modellstudierna. Metoden kommer att vidareutvecklas.

Intrångsscenario

Scenariot som behandlar framtida oavsiktliga mänskliga handlingar som kan tänkas påverka förvaret är omgärdat av stora osäkerheter, framför allt eftersom samhällets och människans utveckling i princip är oförutsägbara. I SR 97 diskuteras hur tänkbara samhällsutvecklingar och framtida mänskliga handlingar som rör förvaret i någon mån ändå kan kategoriseras. I ett illustrerande exempel analyseras en situation där en kapsel i förvaret oavsiktligt penetreras av bergborrare. Dos och risk beräknas för borrhpersonal och för en familj som bosätter sig på platsen i ett senare skede. Risken för både borrhpersonal och familj bedöms ligga långt under acceptanskriteriet, eftersom sannolikheten för de analyserade händelserna uppskattas vara mycket små.

Slutsatser

Den huvudsakliga slutsatsen av säkerhetsanalysen SR 97 är att förutsättningarna för att bygga ett säkert djupförvar för använt kärnbränsle i svensk granitisk berggrund är mycket goda.

De tre analyserade platserna speglar rimliga variationer av förhållandena i granitisk berggrund i Sverige. Analysen ger inte underlag för att tillmäta skillnader i den långsiktiga säkerheten mellan platserna någon avgörande betydelse vid en tänkt sammanvägning av alla de faktorer som påverkar lokaliseringen av ett djupförvar.

En annan slutsats är att den metodik som används i SR 97 utgör en god grund för kommande säkerhetsanalyser som ska baseras på data från genomförda platsundersökningar.

Resultatet av analysen ger också underlag för att formulera krav och önskemål på berggrunden vid platsundersökningar, för att utforma program för platsundersökningar, för att formulera funktionskrav på förvarets barriärer, samt för prioriteringar av forskningsinsatser.

Det kommande steget av djupförvarets lokalisering består i att undersöka berggrunden vid ett antal kandidatplatser i Sverige. Det är SKB:s bedömning att säkerhetsanalysens omfattning och tilltron till dess resultat väl uppfyller de krav som bör ställas inför detta steg.

1 Förutsättningar

I Sverige ålägger lagen ägare av kärnreaktorer att sörja för att radioaktivt avfall från verksamheten tas om hand på ett säkert sätt. De svenska kraftbolagen äger gemensamt Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, som har uppdraget att utveckla metoder för att ta hand om radioaktivt avfall och att bygga och driva de anläggningar hanteringen kräver.

Använt kärnbränsle utgör en viktig komponent i det radioaktiva avfallet eftersom det är både högaktivt och långlivat. För närvarande lagras använt bränsle något år i anslutning till reaktorn för att sedan mellanlagras vid ett centralt mellanlager för använt bränsle, CLAB. Enligt SKB:s planer ska bränslet efter 30 till 40 års mellanlagring inneslutas i kopparkapslar som deponeras på cirka 500 meters djup i urberget. De anläggningar som krävs för detta, en inkapslingsanläggning och ett djupförvar, har ännu inte lokaliserats och byggts.

Utbyggnaden av systemet sker successivt under flera decennier. Lokalisering av anläggningar och system görs i samverkan med berörda kommuner och under övervakning från säkerhets- och strålskyddsmyndigheter samt efter regeringens beslut.

1.1 Varför SR 97?

Inför kommande steg i utbyggnaden uttalade regeringen följande i sitt beslut efter granskningen av SKB:s forskningsprogram FUD 95:

”En säkerhetsanalys av slutförvarets långsiktiga säkerhet bör enligt regeringens bedömning vara genomförd innan en ansökan om uppförande av den planerade inkapslingsanläggningen inges till myndigheterna, liksom innan platsundersökningar på två eller flera platser påbörjas.”

Denna rapport redovisar den begärda säkerhetsanalysen innan platsundersökningar påbörjas. Analysen har arbetsnamnet SR 97 (Säkerhetsrapport 97).

I sin granskning av SKB:s forskningsprogram FUD 98 preciserar Kärnkraftinspektionen, SKI, sin syn på syfte och krav för SR 97:

”Syftet är att göra troligt att KBS-3-metoden har goda förutsättningar att uppfylla de säkerhets- och strålskydds krav som SKI och SSI preciserat de senaste åren”.

SKI skriver också

”...att SR 97, förutom att demonstrera metodik för säkerhetsanalys, också bör ge underlag för att:

- visa på möjligheten att finna en plats i svensk berggrund som uppfyller de krav på långsiktig säkerhet och strålskydd som anges i SSI:s och SKI:s föreskrifter,

- precisera de faktorer som ligger till grund för val av områden för platsundersökningar,
- härleda vilka parametrar som behöver bestämmas och vilka övriga krav som bör ställas på en platsundersökning,
- härleda preliminära funktionskrav på kapseln och de övriga barriärerna.”

1.2 Syften

Utifrån punkterna ovan kan **fyra** konkreta syften med SR 97 formuleras:

1. SR 97 ska ge underlag för att påvisa möjligheten att finna en plats i svensk berggrund där KBS-3 metoden för djupförvaring av använt kärnbränsle uppfyller de krav på långsiktig säkerhet och strålskydd som anges i SSIs och SKI:s föreskrifter.
2. SR 97 ska demonstrera metodik för säkerhetsanalys.

Ambitionen med SR 97 är att genomföra en fullständig analys av den långsiktiga säkerheten för KBS-3-systemet för djupförvaring av använt kärnbränsle. Metodiken som tillämpas i SR 97 omfattar bl a

- en systematisk hantering av alla de inre processer och yttre förhållanden som långsiktigt kan förändra förvaret, samt
- en systematisk hantering av de olika typer av osäkerheter som alltid omgärdar underlaget till en analys.

SR 97 bygger på data från tre verkliga platser. Data har hämtats från SKB:s undersökningar vid Gideå i Ångermanland, från Finnsjön i Norduppland och från berglaboratoriet vid Äspö utanför Oskarshamn i Småland. Platserna har valts som beräkningsexempel för att spegla olika förhållanden i svensk granitisk berggrund vad gäller geologi, grundvattenomsättning, vattenkemi, närhet till kust, nordlig eller sydlig förläggning, omgivande biosfär etc.

Rapporteringen om genomförandet och resultatet av analysen blir därför ett direkt underlag för att bedöma dels möjligheten att finna en säker plats för ett KBS-3-förvar i svensk berggrund, dels metodiken för en säkerhetsanalys.

3. SR 97 ska ge underlag för att precisera de faktorer som ligger till grund för val av områden för platsundersökningar och för att härleda vilka parametrar som behöver bestämmas och vilka övriga krav som bör ställas på en platsundersökning.

SR 97 utgör ett viktigt underlag till ett pågående arbete med syfte att formulera krav och önskemål på berget utifrån bl a perspektivet långsiktig säkerhet. Resultat och erfarenheter från SR 97 används också direkt i arbetet med att formulera ett samlat program för undersökningar och utvärderingar av platser. I slutsatskapitlet sammanfattas på vilket sätt SR 97 utgör underlag för dessa båda arbeten.

4. SR 97 ska ge underlag för att härleda preliminära funktionskrav på kapseln och de övriga barriärerna.

Möjligheterna att härleda funktionskrav ur säkerhetsanalysens resultat diskuteras i slutsatskapitlet.

1.3 Avgränsningar

SR 97 ska utgöra en fullständig säkerhetsanalys av KBS-3-metoden för djupförvaring av använt kärnbränsle där geosfärdata tas från tre verkliga platser i Sverige. Dessutom gäller följande grundläggande förutsättningar:

Långsiktig säkerhet efter förslutning

SR 97 handlar om förvarets långsiktiga säkerhet efter förslutning. Förvarets byggnations- och driftfaser behandlas inte. Dessa faser, liksom andra aspekter som rör hela systemet för omhändertagande (inkapsling, transporter och djupförvaring) redovisas i preliminära rapporter över säkerheten vid utbyggnad och drift. Dessa utgör tillsammans med SR 97 underlag för en samlad systemanalys av alla komponenter i avfallshanteringen som ska redovisas år 2000. Inte heller säkerheten vid ett förlängt öppethållande eller vid ett delvis förslutet förvar utreds i SR 97.

Förvar för använt kärnbränsle

SR 97 behandlar ett förvar för använt kärnbränsle. Dessutom kommer annat långlivat avfall att behöva tas om hand, t ex härdkomponenter vid rivning av kärnkraftverk och avfall från tidigare verksamhet vid forskningsreaktorn vid Studsvik. Detta avfall ska placeras i ett separat förvar, som kan samlokaliseras med förvaret för använt kärnbränsle eller med det slutförvar för radioaktivt driftavfall, SFR, som idag finns i drift. Förvaret kan också ges en egen lokalisering.

En preliminär anläggningsutformning och säkerhetsanalys för ett sådant förvar har utarbetats parallellt med SR 97 och presenteras i en separat rapport. De säkerhetsmässiga konsekvenserna av eventuella samlokaliseringar utreds inte i SR 97 men analyserna baseras på samma geologiska underlag.

Del i helhetssyn på strålskyddsfrågorna

Den långsiktiga säkerheten efter förslutning utgör en aspekt av en helhetssyn på strålskyddsfrågorna vid avfallshanteringen. En helhetsbild redovisas i den systemanalys som nämndes ovan. I den rapporten diskuteras också de frihetsgrader som finns inom ramarna för KBS-3, samt när och på vilket underlag de kommer att utvärderas och låsas.

1.4 Rapportstruktur

Strukturen för redovisningen i SR 97 är en vidareutveckling av den mall som togs fram under 1995 i form av säkerhetsrapporten SR 95.

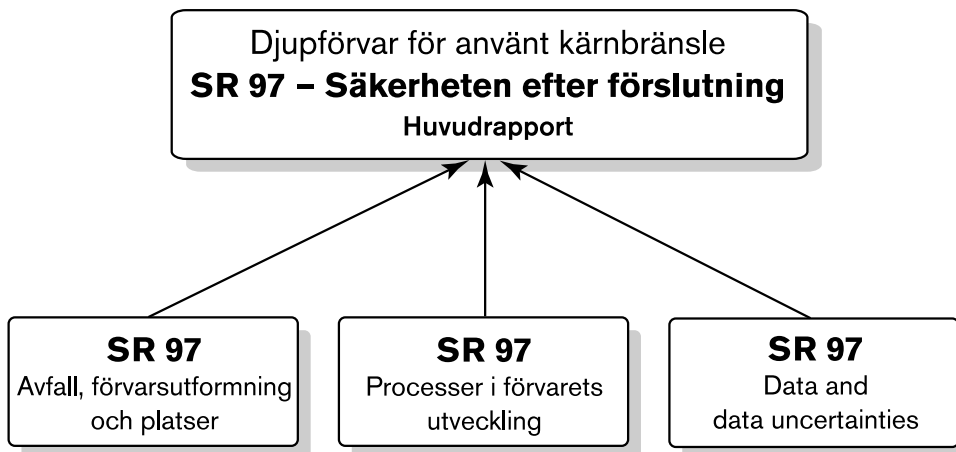
Materialet till en säkerhetsanalys är mycket omfattande. SR 97 redovisas i form av en huvudrapport och till den är tre huvudreferenser nära knutna, se figur 1-1. I huvudrapporten och huvudreferenserna refereras till rapporter i SKB:s rapportserier eller i den öppna litteraturen.

Huvudrapporten – ”Djupförvar för använt kärnbränsle; SR 97 – Säkerheten efter förslutning” – sammanfattar hela säkerhetsanalysen. Den kan läsas fristående från de övriga och innehåller metodikbeskrivning, alla väsentliga resultat samt värderingar och slutsatser. Rapporten består av två delar och en sammanfattning (denna volym). Samtliga delar finns även på engelska.

”SR 97 – Avfall, förvarsutformning och platser” beskriver i detalj avfallet, förvarsutformningen med kapslar och buffert/återfyllningsmaterial, de tre platserna och de plats-specifika anpassningar som gjorts av förvarens utformningar. Rapporten finns även på engelska. I fortsättningen används benämningen ”Förvarssystemrapporten”.

”SR 97 – Processer i förvarets utveckling” beskriver de termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska processer i bränsle, kapsel, buffert och geosfär som styr utvecklingen i förvarssystemet. Rapporten finns även på engelska. I fortsättningen används benämningen ”Processrapporten”.

”SR 97 – Data and data uncertainties” (endast på engelska) innehåller en sammanställning av indata för beräkningar av radionuklidtransport. Här finns också en utvärdering av osäkerheter i indata. I fortsättningen används benämningen ”Datarapporten”.



Figur 1-1. Huvudrapport och några av de viktigaste underlagsrapporterna till SR 97.

1.5 Acceptanskriterier

Utformningen av en säkerhetsanalys och framför allt de kriterier som ska användas för att avgöra förvarets säkerhet anges i föreskrifter från säkerhets- och strålskyddsmyndigheter. Föreskrifterna utgår från övergripande lagar; de viktigaste är miljöbalken, kärntekniklagen och strålskyddslagen. Strålskyddsfrågor hanteras inom en rad internationella organ och internationella regler och rekommendationer ligger ofta till grund för den nationella lagstiftningen.

För den långsiktiga säkerheten finns idag från Strålskyddsinstitutet, SSI, ”Föreskrifter för ett slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle” (SSI FS 1998:1). Föreskrifterna trädde i kraft 1 februari 1999.

Kärnkraftinspektionen, SKI, distribuerade våren 1999 en remissversion av ”Statens kärnkraftinspektions föreskrifter om säkerhet vid slutförvaring av kärnavfall”.

1.5.1 SSI:s föreskrifter för ett slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle

SSI skriver att människors hälsa och miljön nu och i framtiden ska skyddas från skadlig verkan av joniserande strålning. Verksamheten får inte orsaka svårare effekter på människors hälsa och miljön utanför Sveriges gränser än vad som kan accepteras inom Sverige. Ett slutförvar ska utformas så att inga ytterligare åtgärder behövs efter förslutning för att förhindra eller begränsa utflödet av radioaktiva ämnen från slutförvaret. Institutionell kontroll och kunskap om slutförvarets lokalisering i en avlägsen framtid kan inte förutsättas. SSI:s föreskrifter gäller den långsiktiga säkerheten för ett förslutet förvar.

Skydd av människors hälsa

Det övergripande acceptanskriteriet för ett djupförvar uttrycks i 5§ av SSI:s föreskrifter:

”Ett slutförvar för använt kärnbränsle eller kärnavfall skall utformas så att den årliga risken för skadeverkningar efter förslutning blir högst 10^{-6} för en representativ individ i den grupp som utsätts för den största risken.”

Acceptanskriteriet är således ett riskmått. Vid en riskberäkning utreds vilka förlopp som kan leda till skadeverkningar, med vilken sannolikhet de kan inträffa, samt skadans storlek (konsekvensen) för varje förlopp. Produkten av sannolikhet och konsekvens ger en delrisk för varje förlopp. Den samlade risken utgör summan av delriskerna för olika tänkbara förlopp.

SSI anger en årlig risk av 10^{-6} för personer som utsätts för strålning från förvaret. För en tänkt situation med exponering som inträffar med visshet (sannolikheten 1) svarar detta mot en årlig stråldos av 0,015 milliSievert (mSv) från förvaret. Detta kan jämföras med den naturliga bakgrundsstrålningen som i Sverige är flera mSv/år.

Riskgränsen gäller en representativ individ i den grupp som utsätts för den största risken. Som indikation på omfattningen av en sådan grupp anger SSI befolkningen i ett område där det i princip är möjligt att lokalisera tio olika djupförvar. Ett sådant område är svårt att avgränsa i en riskberäkning. Som alternativ anger SSI att det ”kan vara acceptabelt att utföra beräkningarna för en individ som bedöms vara högt belastad, i stället för en individ som är representativ för hela gruppens belastning”.

Riskgränsen för en sådan individ anges till 10^{-5} vilket motsvarar en stråldos av 0,15 mSv/år. Exponeringsmodellerna i SR 97 har inte anpassats till detaljer i SSI:s föreskrifter eftersom dessa inte trädde i kraft förrän i analysens slutskede. Modellerna är dock sedan tidigare utformade för att i de flesta fall beräkna doser till en liten och högt belastad grupp som t ex livnär sig enbart på kontaminerad föda. Beräkningsresultaten i SR 97 bör därför i de flesta fall jämföras med riskkriteriet 10^{-5} /år vilket alltså svarar mot en dosgräns av 0,15 mSv/år för en exponering som säkert inträffar, se vidare avsnitt 3.3.7.

Miljöskydd

SSI anger också att:

”7§ Biologiska effekter av joniserande strålning i berörda livsmiljöer och ekosystem skall redovisas. Redovisningen ska bygga på tillgänglig kunskap om berörda ekosystem ...”

I brist på etablerad metodik anger SSI att försiktighetsprincipen gäller, dvs att blotta misstanken om skadlig påverkan på miljön ska vara tillräcklig för att ingripa eller avstå från en viss verksamhet.

I SR 97 bedöms de biologiska effekterna av ett utsläpp genom att jämföra med den naturliga bakgrundstrålningen. Om utsläppen är små jämfört med bakgrundstrålningen bör effekterna vara försumbara.

Intrång

SSI anger att en redovisning ska göras av följderna av ett oavsiktligt intrång eller annan störning i slutförvaret eller dess närhet. Det väsentliga är inte att redovisa den händelsekedja som leder fram till intrånget, utan att belysa slutförvarets skyddsfunktion efter ett intrång. Skyddsförmågan för ett slutförvar får inte försämrans av planerade åtgärder för att försvåra intrång eller underlätta återtagbarhet.

Doser högre än 1 mSv/år, som kan tänkas förekomma vid ett intrång i slutförvaret, kommer att bedömas separat av SSI.

Tidsperioder

SSI anser att skadliga effekter i framtiden inte ska bedömas som mindre betydelsefulla än de skadliga effekter som människan eller miljön utsätts för idag.

SSI betonar att de inledande 1000 åren av förvarets utveckling är den viktigaste att utreda eftersom avfallets farlighet då är störst. För denna tidsperiod ställs de högsta kraven på redovisningen. Föreskriften kräver också en redovisning av ett fall som utgår från att de biosfärsförhållanden som råder vid tiden för tillståndsansökan inte förändras. Med rådande förhållanden menas att hänsyn också tas till kända förändringar som landhöjning.

Även utvecklingen efter de inledande 1000 åren ska utredas och SSI framhåller vikten av att redovisa de olika typer av osäkerheter i underlaget som ligger till grund för analyserna av olika epoker.

1.5.2 SKI:s remissversion av föreskrifter för säkerhet vid slutförvaring av kärnavfall

Föreskrifterna från SKI finns ännu bara i en remissversion. Föreskrifterna talar bl a om hur säkerhetsanalysen bör behandla olika inre och yttre förhållanden som kan ha betydelse för säkerheten. SKI framhåller betydelsen av en systematisk hantering av osäkerheter och att de modeller och data som används så långt möjligt ska visas vara tillämpliga. Analysen behöver som mest omfatta tidsperioden en miljon år framåt i tiden.

Eftersom föreskrifterna ännu inte finns i en slutlig version har de inte kunnat utgöra en direkt grund för utformningen av SR 97. Allmänt kan ändå sägas att alla moment som tas upp i remissversionen återfinns på ett eller annat sätt i SR 97.

1.6 Säkerhetsprinciper

Parallellt med arbetet att utveckla ett säkert djupförvar i Sverige har också en filosofi vuxit fram för hur det radioaktiva avfallet i Sverige ska hanteras. Den innebär i korthet följande:

- Den långsiktiga säkerheten ska inte kräva framtida övervakning och underhåll.
- Förvaret ska utformas så att det tillåter eventuella framtida åtgärder för att förändra förvaret eller att återta avfallet.
- Förvarets långsiktiga säkerhet ska bygga på flera tekniska och naturliga barriärer som genom olika funktioner bidrar till förvarets totala säkerhet.

Den praktiska tillämpningen av filosofin har resulterat i en förvarsutformning med ett flerbarriärsystem, det s k KBS-3-systemet.

KBS-3-förvaret för använt kärnbränsle är utformat för att i första hand isolera avfallet. I andra hand, om isoleringen av någon anledning till någon del skulle gå förlorad, ska förvaret fördröja utsläppet av radionuklider. Säkerheten åstadkoms med ett system av barriärer som stöder och kompletterar varandra. Säkerheten hos förvaret ska vara tillräcklig även om någon barriär skulle vara defekt eller inte fungera som avsett. Detta är innebörden i flerbarriärprincipen.

En annan princip är att göra förvaret ”naturnära”, dvs att använda naturliga material till de tillverkade barriärerna. Genom att välja material från naturen blir det möjligt att bedöma och utvärdera materialens långsiktiga stabilitet och uppförande i ett djupförvar med hjälp av kunskaper om naturliga förekomster. Av samma skäl strävar man efter att bygga ett förvar som förändrar de naturliga förhållandena i berget så lite som möjligt. Framför allt försöker man begränsa den kemiska påverkan förvaret ger i berget.

1.7 Tidsperspektiv

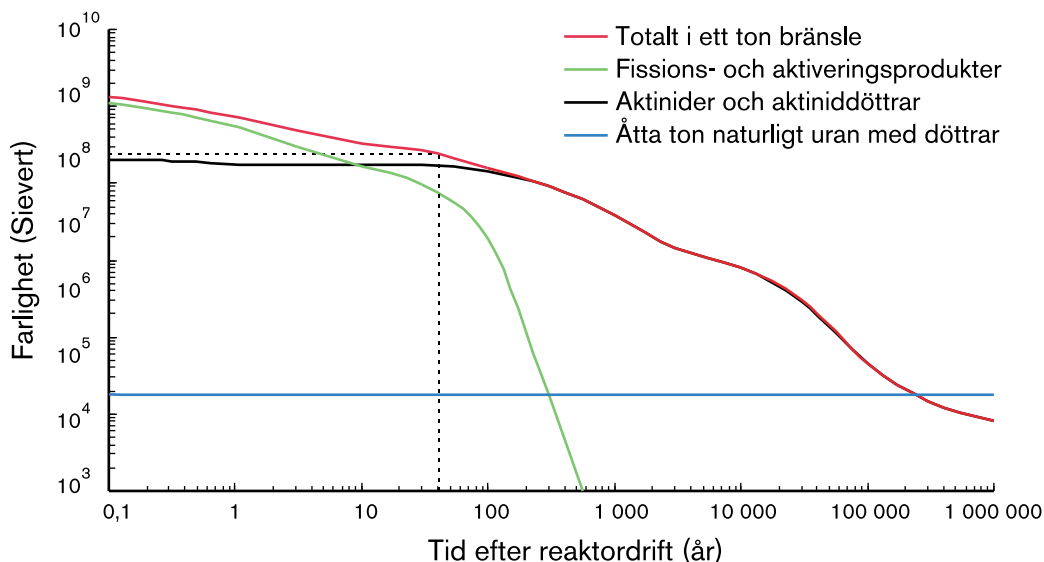
Förvaret ska fungera så länge avfallet är farligt. Det tar många miljarder år innan allt radioaktivt material sönderfallit till stabila ämnen. Farligheten har dock långt tidigare avtagit till nivåer som är jämförbara med t ex farligheten hos den uranmalm som ursprungligen bröts för att framställa bränslet.

För att framställa ett ton bränsle för svenska reaktorer anrikas cirka åtta ton naturligt uran. Under driften ökar bränslets farlighet kraftigt i takt med att nya radioaktiva ämnen bildas då urankärnorna klyvs. Figur 1-2 visar hur farligheten för det använda bränslet sedan avtar med tiden. Efter cirka 100 000 år ligger farligheten hos ett ton använt bränsle i nivå med den för de åtta ton naturligt uran som användes för bränsleframställningen.

Tiden 100 000 år kan därför användas som en riktlinje för hur länge förvaret ska ”fungera”. Denna tid utgör dock inte någon absolut tidsgräns i utvärderingen av förvarets säkerhet:

- Å ena sidan avtar farligheten ständigt och har t ex efter tusen år sjunkit till ungefär en tiondel av nivån vid deponeringen. Detta är viktigt i värderingen av förvarets säkerhet. Med tiden tilltar ovissheten om förhållandena i och omkring förvaret, men samtidigt minskar också farligheten hos bränslet.
- Å andra sidan finns även efter 100 000 år både små mängder radionuklider som relativt lätt kan röra sig genom förvarets barriärer om kopparkapseln skulle skadas, och större mängder svårörliga nuklider.

Förvarets säkerhet behöver således utvärderas långt in i framtiden och ständigt i ljuset av hur farligheten avtar med tiden.



Figur 1-2. Avfallens farlighet som funktion av tid efter uttag ur reaktorn för svenskt BWR-bränsle med en utbränningsgrad av 38 MWdygn per ton. Farligheten avser intag via föda. Efter 30 till 40 års mellanlagring ska bränslet deponeras.

1.7.1 Tidsperioder i SR 97

SR 97 behandlar ett förslutet förvar. I praktiken kommer förvaret att fyllas etappvis under en tidsperiod av cirka 50 år, men i analysen antas att allt bränsle deponeras samtidigt. Bränslet som deponeras antas vara mellanlagrat i 40 år efter uttaget ur reaktorn.

För de första etthundra åren antas i SR 97 att det finns en institutionell kontroll. Det betyder att oavsiktliga intrång i förvaret kan uteslutas under denna period.

I enlighet med SKI:s förslag till föreskrifter ovan är en miljon år den övre tidsgränsen för analyserna i SR 97.

1.8 Metodik

1.8.1 Vad är en säkerhetsanalys?

Säkerhetsanalys är den metod som används för att på ett systematiskt sätt analysera och bedöma funktionen och säkerheten hos ett slutförvar. En säkerhetsanalys av ett djupförvar kan enkelt sägas bestå av att:

- noga beskriva förvarssystemets utseende eller tillstånd då det just förslutits,
- kartlägga vilka förändringar förvaret kan tänkas genomgå med tiden till följd av dels inre processer inom förvaret, dels yttre påverkan,
- utvärdera förändringarnas konsekvenser för säkerheten.

I både genomförandet och presentationen av SR 97 står processerna i fokus. Kunskapen om alla kända inre processer av vikt för den långsiktiga säkerheten dokumenteras i en särskild rapport, Processrapporten. Processerna och deras inbördes kopplingar visas schematiskt i s k THMC-diagram där processerna delas in i kategorierna termiska (T), hydrauliska (H), mekaniska (M) och kemiska (C efter engelskans chemical). I analysen knyts grupper av kopplade processer ihop till en beskrivning av en integrerad utveckling i tiden.

Genomförandet och redovisningen av SR 97 kan delas in i fem moment.

1. Systembeskrivning

En systematisk analys kräver en strukturerad beskrivning av förvaret samt av alla de inre processerna, sambanden dem emellan och de egenskaper hos förvaret som respektive process påverkar. Att upprätta en sådan *systembeskrivning* är därför en första uppgift i en säkerhetsanalys. Här ingår också att definiera gränsen mellan system och omgivning. I SR 97 används THMC-strukturen för systembeskrivningen. Metodiken beskrivs närmare i avsnitt 2.1.

2. Beskrivning av initialt tillstånd

Därefter beskrivs förvarets utseende då det just förslutits eller dess *initiala tillstånd*. Här beskrivs dimensioner och material för de tillverkade barriärerna liksom berggrundens egenskaper kring förvarsanläggningen så som dessa initialt ser ut. Även ofullständigheter i kunskapen om initialtillståndet beskrivs.

3. Val av scenarier

Förvarets utveckling påverkas av omgivningen. Bedömningar av omgivningens utveckling innehåller med nödvändighet osäkerheter: Vilka framtida klimatförhållanden kan förväntas? Vilka frekvenser och magnituder av jordskalv kan förväntas i förvarets omgivning i framtiden? För att täcka in olika möjligheter analyseras förvarets utveckling för ett antal olika händelseutvecklingar i omgivningen; ett antal olika scenarier väljs och analyseras. De valda scenarierna bör tillsammans ge en rimlig täckning av de olika utvecklingsvägar förvaret och dess omgivning kan tänkas ta.

Scenarier kan även baseras på olika antaganden om initialtillståndet i förvaret av vikt för den långsiktiga utvecklingen.

4. Analys av valda scenarier

Med hjälp av systembeskrivningen analyseras förvarets utveckling för varje scenario. Här används efter behov en rad olika verktyg och metoder, allt ifrån resonemang och enkla överslag till detaljerade modellberäkningar baserade på platsspecifika data.

I SR 97 analyseras först ett basscenario där förvaret tänks vara byggt enligt specifikationer och där dagens omgivningsförhållanden, bl a klimatet, tänks bestå.

Därefter analyseras en rad andra scenarier där utvecklingen jämförs med den i basscenarioet. Hur förändras utvecklingen om klimatet förändras? Vid jordskalv? Om någon barriär har tillverkningsfel? Vilken betydelse har förändringarna för säkerheten? En grund för att genomföra och redovisa analyserna i form av jämförelser med ett basscenario är att det analyserade förvarssystemet är konstruerat för att vara robust, dvs varierande förhållanden i omgivningen ska inte ge dramatiska förändringar i förvarets utveckling och funktion.

5. Utvärdering

Slutligen görs en samlad bedömning av förvarets säkerhet. Här vägs de olika scenarierna ihop till en total riskbild. Slutsatserna i bedömningen utgör analysens resultat. Här diskuteras också tilltron till resultatet i ljuset av de osäkerheter som finns i underlaget till analysen.

1.8.2 Hantering av osäkerheter

Lika viktigt som bedömningen av förvarets skyddsförmåga är tilltron till resultatet. Underlaget till en säkerhetsanalys är alltid behäftat med brister av olika slag. Det blir t ex aldrig möjligt att i detalj känna till sprickstrukturen i förvarsberget eller att nå visshet om det framtida klimatet. Säkerheten måste utvärderas i ljuset av sådana brister. Enkelt uttryckt står man inför uppgiften att visa huruvida förvaret utformats med tillräckliga marginaler för att vara säkert trots den bristande kunskapen. Tilltron till resultatet beror bl a av hur metodiskt denna hantering av osäkerheter/brister genomförs.

Hantering av osäkerheter är inte någon separat verksamhet utan utgör en integrerad del av analysarbetet. Här diskuteras ändå hanteringen samlat eftersom den utgör en viktig del i metodiken.

Brister kan vara av kvalitativ eller kvantitativ natur. Kvalitativa brister rör t ex frågor om fullständighet: Har alla processer som påverkar förvarets utveckling identifierats i systembeskrivningen? Har alla typer av yttre påverkan täckts in i valet av scenarier?

Andra kvalitativa frågor rör processförståelse: Förstår vi de inre processerna tillräckligt väl för säkerhetsanalysens behov? Förstår vi processerna som styr förhållanden i omgivningen tillräckligt väl?

Andra frågor är kvantitativa. Hur väl kan initialtillståndet bestämmas? Förvarets initiala temperatur kan bestämmas med en noggrannhet som mer än väl täcker analysens behov, medan beskrivningen av geosfärens sprickgeometri är behäftad med osäkerheter som kräver en mer genomtänkt hantering. Hur väl kan vi kvantitativt beskriva olika processer, t ex värmeledning eller grundvattenströmning? Denna fråga är speciellt viktig för analysen av radionuklidtransport som ju har en direkt betydelse för värderingen av förvarets säkerhet. Beräkningar av radionuklidtransport hanterar mängder av indata, som kan vara behäftade med osäkerheter i varierande grad.

Hanteringen av osäkerheterna består dels i att redovisa osäkerheter och brister i underlaget, dels i att hantera dem vid genomförandet av analysen. Tabell 1-1 visar de olika typer av osäkerheter som kommer in i analysens fyra första moment.

Som framgår av tabellen har det som ofta benämns konceptuell osäkerhet, med något varierande innebörd i olika sammanhang, i SR 97 delats in i begreppen ”grundläggande processförståelse” och ”modellosäkerhet”. Med det förra avses den vetenskapliga förståelsen av en process, med det senare de osäkerheter som tillkommer då en process beskrivs med hjälp av en modell i en säkerhetsanalys. Den grundläggande förståelsen för processen grundvattenströmning är till exempel mycket god. Matematiska modeller för grundvattenrörelser i sprickigt berg kan ändå formuleras på olika sätt, vilket innebär en osäkerhet. De olika formuleringarna representerar skilda sätt att hantera det faktum att detaljerna i spricksystemets natur är kända endast i en statistisk mening.

Tabell 1-1. De typer av osäkerheter som kommer in i analysens fyra första moment och var dessa redovisas och hanteras i sammanfattningen.

| | |
|---|---|
| 1. Systembeskrivning <i>Fullständighet</i> | Diskuteras i avsnitt 2.7. |
| <i>Processförståelse</i> <i>(konceptuell osäkerhet)</i> | Redovisas utförligt i en separat rapport, Processrapporten. |
| 2. Beskrivning av initialtillstånd <i>Dataosäkerhet</i> | Kvantitativa osäkerheter i initialtillståndet redovisas för varje variabel i kapitel 6 i den fullständiga huvudrapporten. |
| 3. Val av scenarier <i>Fullständighet/täckningsgrad</i> | Diskuteras i avsnitt 3.1.1. |
| 4. Analys av valda scenarier <i>Modellosäkerhet</i> <i>(konceptuell osäkerhet)</i> | Tilltron till använda modeller i allmänhet diskuteras kort där modellstudier redovisas i kapitel 3. Tilltron till modeller för radionuklidtransport och grundvattenströmning redovisas mer utförligt i avsnitt 9.11 i den fullständiga huvudrapporten. |
| <i>Indata till modeller/ beräkningar</i> | Dataosäkerheter i allmänhet diskuteras kort där beräkningar och modellstudier redovisas i kapitel 3. Dataosäkerheter som rör radionuklidtransport och grundvattenströmning redovisas och diskuteras utförligt i en särskild datarapport. I beräkningarna av radionuklidtransport görs osäkerhetsanalyser och probabilistiska analyser. |

Osäkerheter i data för radionuklidtransport

Resultaten av beräkningarna av radionuklidtransport kvantifierar förvarets säkerhet. Därmed är det särskilt viktigt att säkerställa kvaliteten i dessa beräkningar. Hanteringen av osäkerheter i indata till radionuklidtransportberäkningar måste därför vara rigorös.

Data till transportberäkningar i SR 97 hämtas från en rad underlagsrapporter av experter inom respektive område. Många av rapporterna är speciellt framställda för SR 97. Varje författare har diskuterat osäkerheter i data enligt en given mall. Därefter har diskussionen kring osäkerheterna i de enskilda rapporterna värderats i Datarapporten. För samtliga indata anger Datarapporten också:

- ett rimligt värde och
- ett pessimistiskt värde.

För några indata har utöver rimligt och pessimistiskt värde dessutom statistiska fördelningar redovisats. Detta gäller bl a data som uppvisar rumslig variabilitet eller sådana som bestäms av rumsligt variabla förhållanden. I geosfären ger heterogeniteten i bl a spricksystemet en fördelning i rummet av olika data till beräkningar, ofta efter omfattande analyser.

Spännvidden mellan rimligt och pessimistiskt värde utgör en möjlighet att representera osäkerheter i indata. Beräkningar av radionuklidtransport genomförs med olika kombinationer av rimliga och pessimistiska data för att belysa betydelsen av olika osäkerheter.

Dessutom krävs någon form av probabilistiska analyser för att komma fram till ett riskmått som kan jämföras med acceptanskriteriet för djupförvaret. Dessa görs i SR 97 med följande ansats:

- Statistiska fördelningar används bara när det finns ett statistiskt underlag att basera en fördelning på, se exemplen ovan.
- För övriga data används de rimliga och de pessimistiska värdena. Båda tilldelas sannolikheter som väljs så att risken bedöms bli överskattad i den probabilistiska analysen.

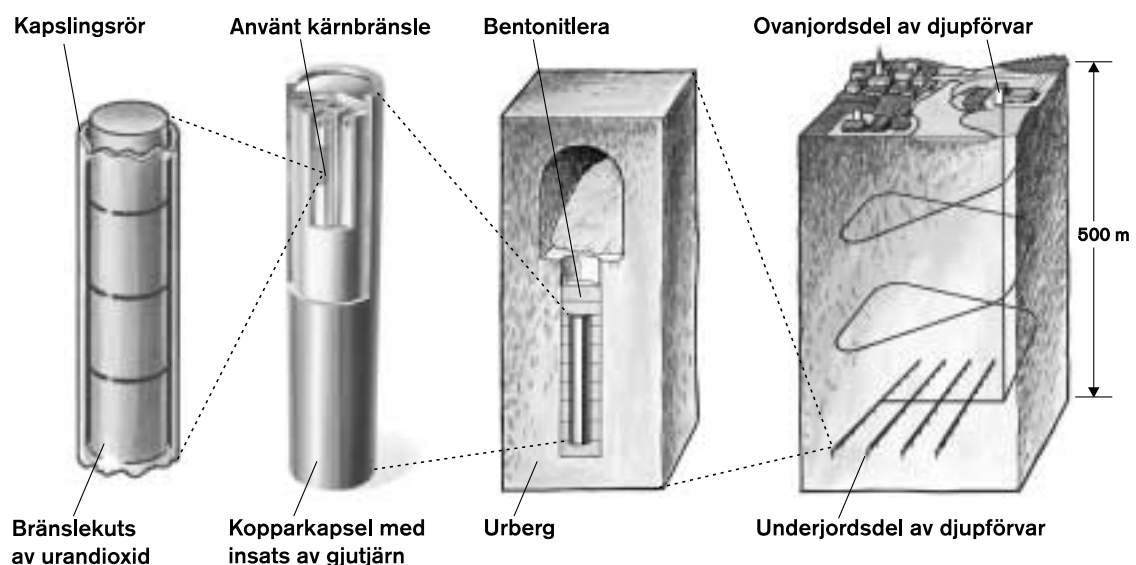
2 Systembeskrivning/initialtillstånd

KBS-3-förvaret för använt kärnbränsle är uppbyggt av ett system av barriärer, se figur 2-1:

- Bränslet placeras i korrosionsbeständiga kopparkapslar. De fem meter långa kapslarna är försedda med en insats av järn som ger mekanisk hållfasthet.
- Kapslarna omges av ett lager av bentonitlera som skyddar kapseln mekaniskt vid mindre bergrörelser och hindrar grundvatten och korroderande ämnen att komma in till kapseln. Leran adsorberar även effektivt många radioaktiva ämnen som kan frigöras om kapslarna skulle skadas.
- Kapslarna med omgivande bentonitlera placeras på cirka 500 meters djup i urberget. Här råder långsiktigt stabila mekaniska och kemiska förhållanden.
- Om någon kapsel skulle skadas utgör bränslets och de radioaktiva ämnens kemiska egenskaper, t ex deras svårslöslighet i vatten, kraftiga begränsningar för transport av radioaktiva ämnen från förvaret till markytan. Detta gäller speciellt de långsiktigt farligaste ämnena som americium och plutonium.

Säkerhetsanalysen utgår från förvarssystemet så som det ser ut vid en initial tidpunkt, i SR 97 tidpunkten för förslutning. Därefter analyseras hur förvarssystemet förändras av inre processer och av yttre påverkan.

För att möjliggöra en fullständig analys krävs en formaliserad beskrivning av förvarssystem och processer med alla kopplingar och samband som styr utvecklingen. Metodiken som används i SR 97 innebär att först beskriva processer, variabler och kopplingar dem emellan schematiskt i vad som kallas en systembeskrivning. Därefter tilldelas variablerna initiala värden, den formaliserade beskrivningen av initialtillståndet.



Figur 2-1. KBS-3-systemet.

Tillvägagångssättet tillämpas strikt i den fullständiga versionen av huvudrapporten. I denna sammanfattning ges först en förenklad redogörelse för metodiken för systembeskrivning. Efter det beskrivs mer i detalj hur de olika barriärerna ser ut initialt, men inte lika strikt formaliserat som i den fullständiga huvudrapporten. Beskrivningen av den geologiska barriären, förvarsberget, blir samtidigt platsbeskrivningar för de tre platser som analyseras i SR 97.

Sist i kapitlet ställs ett antal tekniska kriterier upp mot vilka säkerheten långsiktigt kan utvärderas följt av en diskussion om fullständigheten i systembeskrivningen.

2.1 Metodik

2.1.1 Systembeskrivning på THMC-format

En systematisk analys kräver en beskrivning av alla kända inre processer av någon tänkbar betydelse, sambanden dem emellan och de egenskaper hos förvaret som respektive process påverkar. Strukturen för beskrivningen bör kunna ge såväl överblick som detaljer. Ett annat krav på strukturen är att den genomgående ska kunna användas i redovisningen av säkerhetsanalysen.

Förvaret delas för systembeskrivningen in i de fyra systemdelarna bränsle, kapsel, buffert/återfyllning och geosfär. För varje systemdel kartläggs alla kända termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska processer som har betydelse för förvarets utveckling. Också påverkan mellan systemdelar, t ex buffert och geosfär kartläggs. Även dessa är i huvudsak termiska, hydrauliska, mekaniska eller kemiska till sin natur. Detta sätt att strukturera processer och interaktioner i säkerhetsanalysen är nytt för SR 97 medan arbetet med att identifiera de processer som ingår i strukturen pågått under lång tid.

Variabler bestämmer tillståndet

Tillståndet i en systemdel karakteriseras i varje ögonblick av en uppsättning variabler. Geosfärens tillstånd karakteriseras t ex av dess temperatur, som varierar i tid och rum, av sprickgeometrin (som varierar kraftigt i rummet, men knappast alls i tiden), av grundvattenflödet, grundvattensammansättningen, bergspänningar etc.

Tillsammans ska variablerna karakterisera systemet tillräckligt väl för att det ska vara möjligt att genomföra en säkerhetsanalys. Vissa variabler som temperatur och grundvattensammansättning används eller bestäms direkt i analyser och beräkningar medan andra ligger till grund för att härleda viktiga egenskaper hos systemet: geosfärens värmeledningsförmåga och densitet kan t ex i princip beräknas ur variabeln matris-mineral.

Alla variabler är tidsberoende och påverkas av en eller flera processer och alla processer påverkas av en eller flera variabler.

THMC-diagram

För varje förvarsdel samlas alla processer, variabler och beroenden dem emellan i ett diagram. Här återfinns också interaktioner med intilliggande förvarsdelar. Diagrammet kallas THMC-diagram efter indelningen av processerna och interaktionerna i termiska (T), hydrauliska (H), mekaniska (M) och kemiska (C efter engelskans chemical)

kategorier. THMC-diagrammet för buffert/återfyllning visas i figur 2-2. I diagrammet återfinns dessutom strålrelaterade processer, som har att göra med radioaktiva sönderfall och strålutbredning i förvarssystemet och processer relaterade till transport av radionuklider.

Dokumentation av processer

Till systembeskrivningen hör även att dokumentera kunskapen om varje process. Processdokumentationen utgör en hörnsten i underlaget till säkerhetsanalysen. För SR 97 har kunskapen om samtliga identifierade processer i systembeskrivningen dokumenteras i Processrapporten. För varje process ges bl a:

- en allmän beskrivning av processen, bl a av vilka variabler som påverkar och påverkas,
- en dokumentation av modellstudier/experimentella studier,
- en diskussion om osäkerheter i såväl förståelse som data till processen,
- förslag till hur processen kan hanteras för olika scenarier i säkerhetsanalysen.

2.2 Bränsle

Den totala mängden bränsle från de 12 svenska kärnreaktorerna beror på drifttid, energiuttag och bränslets utbränningsgrad. Vid årsskiftet 97/98 hade ungefär 4 000 ton använt bränsle genererats. Med en drifttid av 40 år för samtliga reaktorer kan den totala mängden använt bränsle uppskattas till 9 500 ton. Motsvarande mängd för 25 års drifttid blir 6 500 ton.

I SR 97 antas att cirka 8 000 ton bränsle ska deponeras. I de flesta delanalyser antas förenklat alla kapslar innehålla bränsle från kokarvattenreaktorer, BWR-bränsle, av typ SVEA 96 med en utbränningsgrad av 38 MWd/tU.

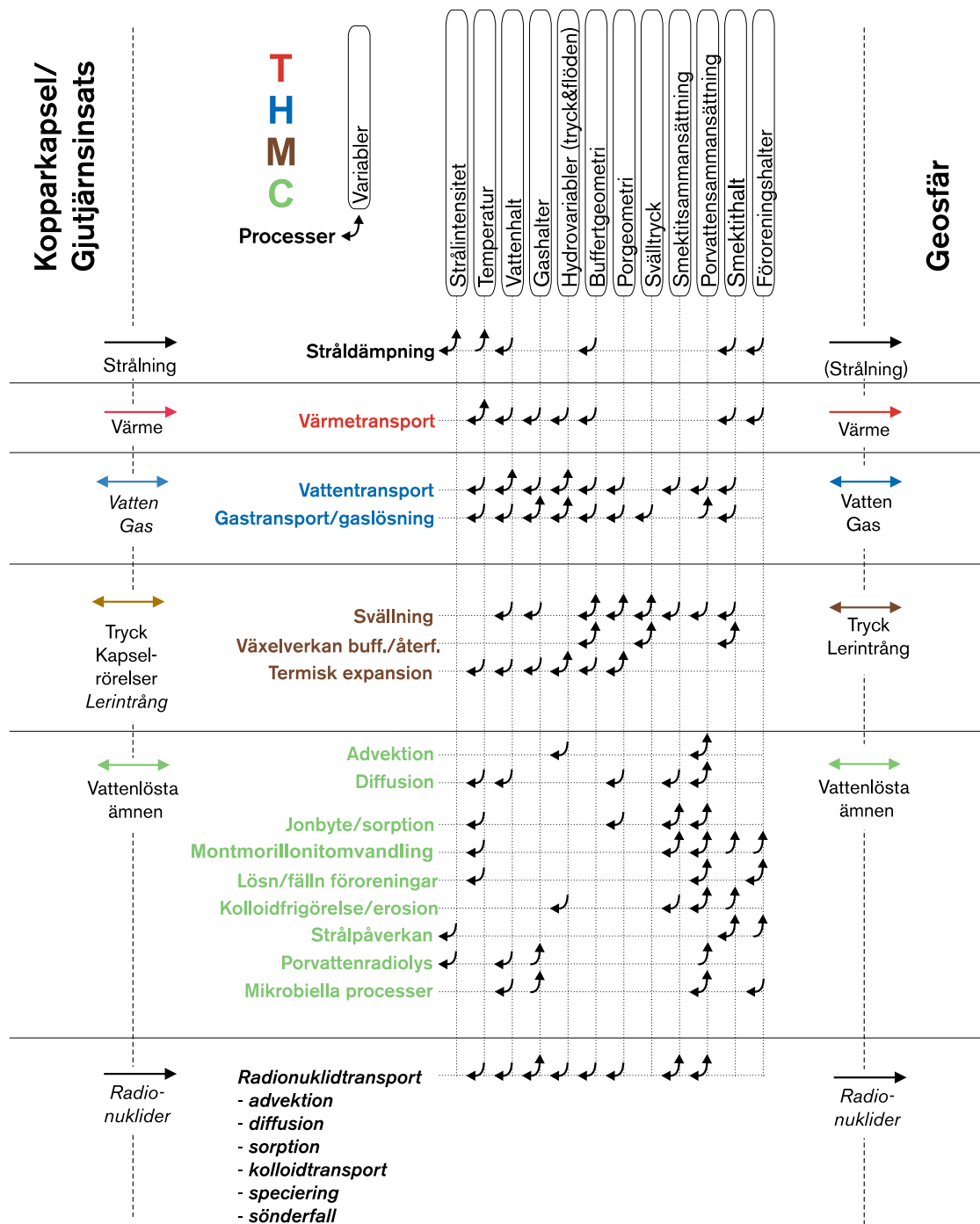
Bränsleelementens uppbyggnad

Kärnbränsle består av cylindriska kutsar av urandioxid. Kutsarna är 11 mm höga och har en diameter av 8 mm. I bränsle av typen SVEA 96 ligger kutsarna staplade i cirka 4 meter långa kapslingsrör av zirkaloy, en beständig zirkoniumlegering. Rören är förslutna med svetsar och hopmonterade till bränsleelement. Varje element har 96 kapslingsrör. Ett bränsleelement innehåller dessutom bl a komponenter av nickellegeringarna Inconel och Incoloy samt delar av rostfritt stål.

Radionuklider

Radionuklider bildas under reaktordriften genom klyvning av kärnor av framför allt uran-235 och plutonium-239 samt genom att neutroner infångas av kärnor i bränslets metalldelar. Nuklider som bildas vid klyvning kallas fissionsprodukter, sådana som bildas genom neutronupptag benämns aktiveringsprodukter. Dessutom kan uran bilda plutonium och andra tyngre element genom att ta upp en eller flera neutroner. Huvuddelen av radionukliderna ligger inbäddade i bränslematrisen av urandioxid. Några få fissionsprodukter är relativt lätttrörliga i bränslet och kan vandra till bränslekutsarnas yta under driften.

Buffert/Återfyllning



Figur 2-2. THMC-diagrammet för buffert/återfyllning.

THMC-beskrivning av processer och variabler

I den fullständiga THMC-beskrivningen av bränslet är viktiga variabler bl a mängd och fördelning av radionuklider samt dimensioner och materialsammansättning hos framför allt bränslematrisen och kapslingsrören. Viktiga bränslerelaterade processer är bränsleupplösning och lösning/fällning av radionuklider.

2.3 Gjutjärnsinsats/kopparkapsel

Kapseln består av en inre behållare av gjutjärn och ett hölje av koppar. Gjutjärnsinsatsen ger mekanisk stabilitet och kopparhöljet skyddar mot korrosion i förvarsmiljön. Kopparhöljet är 5 cm tjockt och kapseln har formen av en cirka 4,8 meter hög cylinder med en diameter av 1,05 meter.

Insatsen har kanaler där bränsleelementen placeras och finns i två utformningar; en för 12 BWR-element och en för 4 PWR-element. Bränslekanalerna tillverkas i form av en kassett av kvadratiske rör. Därefter tillverkas innerbehållarens väggar och botten genom att kringgjuta kassetten med järn.

Kopparkapseln tillverkas antingen av heldragna sömlösa rör eller genom att samman-svetsa två rörhalvor av valsad plåt. En botten fästs med elektronstrålesvets på så sätt att svetsen kan undersökas med ultraljud och röntgenradiografi.

Efter att bränsle deponerats i kapseln fästs kopparhöljets lock med elektronstrålesvets och tätteten kontrolleras med ultraljud och röntgenradiografi.

Kapseln väger totalt cirka 25 ton fylld med 12 BWR-element. En kapsel rymmer cirka två ton bränsle. I SR 97 antas att cirka 8 000 ton bränsle ska deponeras vilket alltså svarar mot cirka 4 000 kapslar.

THMC-beskrivning av processer och variabler

I den fullständiga THMC-beskrivningen av kapseln är viktiga variabler bl a material-sammansättning och dimensioner hos kopparhölje och gjutjärnsinsats som framför allt avgör kapselns hållfasthet och korrosionsbeständighet. Viktiga processer i kapseln på sikt är kopparkorrosion och deformation vid yttre laster.

2.4 Buffert/återfyllning

Kopparkapslarna kommer vid deponeringen att omges av en buffert av bentonitlera. Vid deponeringen lämnar man av tekniska skäl spalter mellan kapsel och buffert samt mellan buffert och berg. Den inre spalten fylls med vatten och den yttre med bentonitpellets och vatten.

Tunneln ovanför deponeringshålet kommer efter deponeringen att återfyllas med ett material som anpassas till framför allt grundvattnets salthalt på förvarsplatsen.

Buffertmaterial

Bufferten består av MX 80 bentonit, en naturlig lera från Wyoming eller South Dakota i USA. Beteckningen MX 80 är ett handelsnamn och specificerar en viss kvalitet och kornstorlek av torkad och mald bentonit.

MX 80 bentonit består till 65–80 procent av smektitmineralet montmorillonit där lerpartiklarna är mindre än 2 mm. Kemiskt kan montmorillonit beskrivas som en s k polyelektrolyt, där utbytbara positiva joner är associerade till de negativt laddade lerpartiklarnas ytor. Leran har den karakteristiska egenskapen att svälla i kontakt med vatten. De utbytbara jonerna i MX 80 domineras av natrium och materialet kallas därför också natriumbentonit. Vattenmättad buffert innehåller cirka 25 viktprocent vatten. Vattenmolekylerna är absorberade i materialet och vattentransport sker huvudsakligen genom diffusion.

I MX 80 bentonit finns också bl a mineralen kvarts (cirka 15 procent) och fältspat (5–8 procent). Kemiskt viktiga komponenter utöver dessa mineral är karbonater (t ex kalцит), sulfater, fluorider, sulfider (t ex pyrit), järn(II) och organiskt material.

Bentoniten får efter bevätning ett porvatten med karakteristisk sammansättning som beror av sammansättningen hos bentoniten och hos det vatten som används för bevätning.

Återfyllningsmaterial

Återfyllningsmaterialet består av en blandning av bentonitlera och bergkross. Proportionerna anpassas efter de kemiska förhållandena på förvarsplatsen, framför allt grundvattnets salthalt, så att återfyllningen får önskade egenskaper. I SR 97 har en sådan platsspecifik anpassning inte gjorts. I stället används en typisk sammansättning som består av 15 viktprocent MX 80 bentonitlera och 85 viktprocent bergkross.

THMC-beskrivning av processer och variabler

I den fullständiga THMC-beskrivningen av buffert/återfyllning är viktiga variabler bl a materialsammansättning, dimensioner, vattenhalt och densitet. Densiteten avgör framför allt förmågan att bära kapseln. Materialsammansättning och vattenhalt avgör buffertens förmåga att begränsa transport av vattenlösta korroderanter in till kapseln och av eventuella radionuklider till omgivande berg. Viktiga buffertrelaterade processer är vattenupptag, svällning och kemiska transport- och reaktionsprocesser.

2.5 Geosfär/platsbeskrivningar

2.5.1 Kristallint berg

Djupförvaret ska förläggas i kristallint berg med granitisk sammansättning. Granitisk berggrund består till största delen av mineralen kvarts, fältspat, glimmermineral och amfiboler (hornblände). Dessutom finns mindre mängder av s k accessoriska mineral som kan ha geokemisk betydelse.

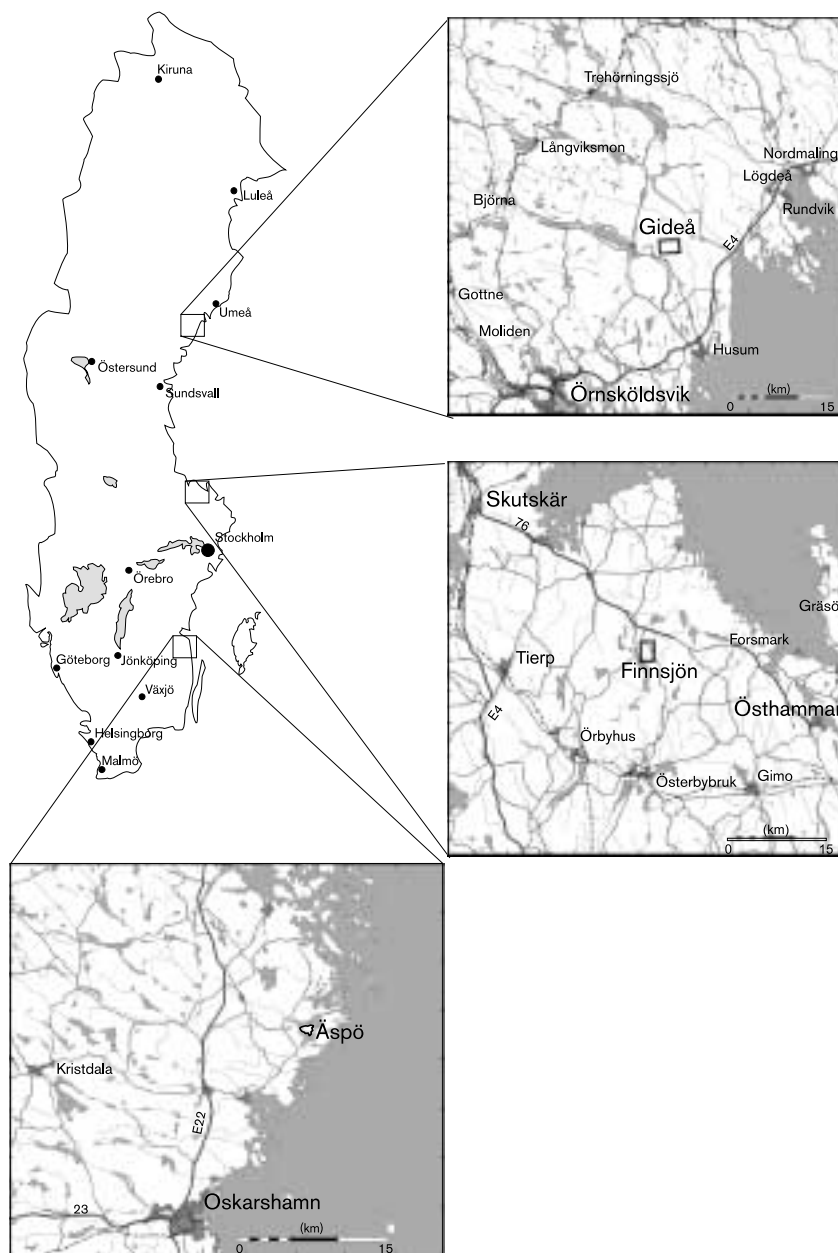
Det kristallina berget karakteriseras också av ett system av sprickor. Frekvens, rumslig fördelning, storleksfördelning, form och orientering hos sprickorna är avgörande för både hydrauliska och mekaniska egenskaper hos berget. Sprickor förekommer i alla skalor från mikroskopiska sprickor i bergmatrisen till sprickzoner, dvs stora stråk med markerat

förhöjd spricktäthet i förhållande till det omgivande berget. Sprickzoner utgör ofta dominerande flödesvägar för grundvattnet. Storleken hos de berggrörelser som kan förekomma i sprickzoner är relaterad till zonens utsträckning.

2.5.2 De tre platserna i SR 97

Tre hypotetiska förvarsplatser analyseras i SR 97 för att illustrera verkliga förhållanden i svensk kristallin berggrund. Data tas från Äspö i Småland, Finnsjön i Uppland respektive Gideå i Ångermanland, se figur 2-3. Platserna representerar tre områden i stabil geologisk miljö. Samtliga platser är relativt kustnära och Äspö ligger i skärgårdsmiljö.

De tre platserna har undersökts av olika experter vid olika tillfällen under en tjuugoårsperiod och med delvis olika syften och omfattning på undersökningarna. Undersökningsmaterialet är störst för Äspö och minst för Gideå.



Figur 2-3. Data för de hypotetiska förvarsplatserna Aberg, Beberg och Ceberg är hämtade från Äspö, Finnsjön respektive Gideå.

De förvar som analyseras vid de tre platserna är hypotetiska. Ingen av platserna är aktuell för platsundersökningar i det pågående lokaliseringsarbetet. För att understryka detta används i fortsättningen namnen Aberg, Beberg och Ceberg för platserna vid Äspö, Finnsjön respektive Gideå.

Äspö (Aberg)

Vid Äspö har SKB under tidsperioden 1986-1995 byggt ett berglaboratorium, Äspö-laboratoriet. En stor mängd data samlades in innan och under byggnationen av underjordsanläggningen. Anläggningen används idag i forskningssyfte och data om berget samlas kontinuerligt in från olika forskningsprojekt i laboratoriet. I SR 97 används endast data från förundersökningarna och från byggskedet.

Äspö är en skärgårdsö belägen cirka 2 km norr om Simpevarps kärnkraftverk i Oskarshamns kommun. Landskapet är flackt med tunt jordtäckte på höjder och mossar i sänkor. Skogsmark dominerar men det finns även uppodlad mark och hagmark. Höjdskillnaden mellan högsta och lägsta (havet) punkt i regionen kring Äspö är cirka 30 m. Landhöjningen är 1–2 mm per år.

Cirka 1 800 miljoner år gamla smålandsgraniter dominerar regionens berggrund. Underordnat finns gabbro och diorit, liksom brottstycken av äldre bergarter. En sk yngre granit, med en ålder av 1 400 miljoner år, finns som några större massiv norr och söder om Äspö. Inom själva ön Äspö finns fyra bergarter; Äspödiorit, Ävrögranit, grönsten och finkornig granit. De två första är vanligast och tolkas som varianter av Smålandsgranit.

I regionen finns kilometerstora höjdområden som begränsas av större dalgångar. Dessa tolkas vanligen som regionala sprickzoner. I och kring Äspö är frekvensen av regionala sprickzoner hög jämfört med den omgivande regionen. Det finns få observerade regionala plastiska skjuvzoner. Ett undantag är en cirka 100 m bred nordostlig zon som skär igenom centrala delen av Äspö.

Frekvensen av tolkade och observerade regionala och lokala sprickzoner inom Äspö är relativt hög.

Sprickzonernas transmissivitet, såsom den är uppmätt i borrhål på Äspö, varierar mellan cirka 10^{-4} och 10^{-7} m²/s. Den hydrauliska konduktiviteten i bergmassan mellan sprickzonerna på Äspö är i medeltal cirka 10^{-8} m/s under 100 m. Ingen förändring med större djup har noterats.

Grundvattnet under Äspö är sött ner till cirka 200 meters djup, därunder ökar salthalten och håller på 500 meters djup cirka 11 000 mg/l, vilket är dubbelt så salt som dagens Östersjövatten.

Finnsjön (Beberg)

Finnsjön undersöktes huvudsakligen under 1977–1978. Området var ett av tre som studerades för att få underlag till KBS-projekten. Huvuddelen av den kunskap som finns idag från området härrör från ett forskningsprojekt som drevs mellan åren 1985–1989 i områdets norra del. Projektets syfte var att studera den geologiska och hydrogeologiska karaktären av en flack vattengenomsläpplig sprickzon och utvärdera dess betydelse för ett förvar av använt kärnbränsle.

Finnsjön ligger strax norr om Österbybruk, i Tierps kommun. Avståndet till Östersjön är cirka 14 km. Landskapet i och kring Finnsjön är flackt med berghällar, myrar och mindre insjöar. Inom området finns skog och myr. Mindre uppodlade partier finns i dess omgivning. Landhöjningen är 5–6 mm/år.

De äldsta bergarterna i regionen är cirka 1 900 miljoner år gamla omvandlade sedimentära och vulkaniska ytbergarter. I de sistnämnda förekommer järnmineral. Större delen av regionen består av något yngre djupbergarter; gabbro, diorit, tonalit, granodiorit och granit. Dessa har trängt in i den äldre ytberggrunden. Samtliga ovannämnda bergarter har påverkats av en deformationsfas för 1 850–1 780 miljoner år sedan. I Finnsjön-området domineras berggrunden av granodiorit som vanligtvis är grå med en nordvästlig och brantstående foliation. I tektoniskt påverkade delar är granodioriten rödfärgad.

Deformationsfasen gav upphov till ett omfattande system av plastiska regionala skjuvzoner som i huvudsak har nordvästlig riktning. Denna riktning är även vanlig för regionala sprickzoner som i kombination med korsande zoner ger upphov till ett blockliknande nätverk av sprickzoner i regionen.

Finnsjön kan indelas i ett nordligt och ett sydligt block, separerade av en brantstående sprickzon. Blocken begränsas i väster och öster av breda regionala zoner. I det norra blocket finns en flack sprickzon. Dess överyta ligger på 100–300 meters djup och zonen har en tjocklek av cirka 100 meter. Zonen har inte påträffats i borrhål i det södra blocket. Ett flertal mindre sprickzoner förekommer inom båda bergblocken.

Vad beträffar sprickzonernas transmissivitet intar den flacka zonen en särställning med en transmissivitet av cirka 10^{-3} m²/s. Motsvarande värde för övriga sprickzoner varierar mellan cirka 10^{-4} och 10^{-8} m²/s. Den hydrauliska konduktiviteten i bergmassan mellan sprickzonerna på nivåer under 100 meters djup är i medeltal cirka 10^{-8} m/s. Flödesmätningar och andra observationer påvisar ett högt flöde i den flacka zonen övre del. Beräkningar baserade på dessa mätningar indikerar ett naturligt flöde i denna del av zonen på mellan 5 och 10 liter/sekund över en tvärsnitt av 1 000 meter. Under zonen övre del visar motsvarande mätning på ett mycket lågt naturligt flöde.

I det norra blocket är grundvattnet sött ner till överytan på den flacka zonen. Därunder är grundvattnet salt, cirka 9 000 mg/l, vilket är dubbelt så mycket som dagens Östersjövattnet. Baserat på kol-14 och tritium data uppvisar samtliga prov från saltvattnet en mycket lång uppehållstid och en låg andel nybildat grundvatten. I det södra blocket, där den flacka zonen saknas, är grundvattnet sött ner till borrhålens slut (cirka 700 m). Här saknas moderna grundvattenkemiska analyser.

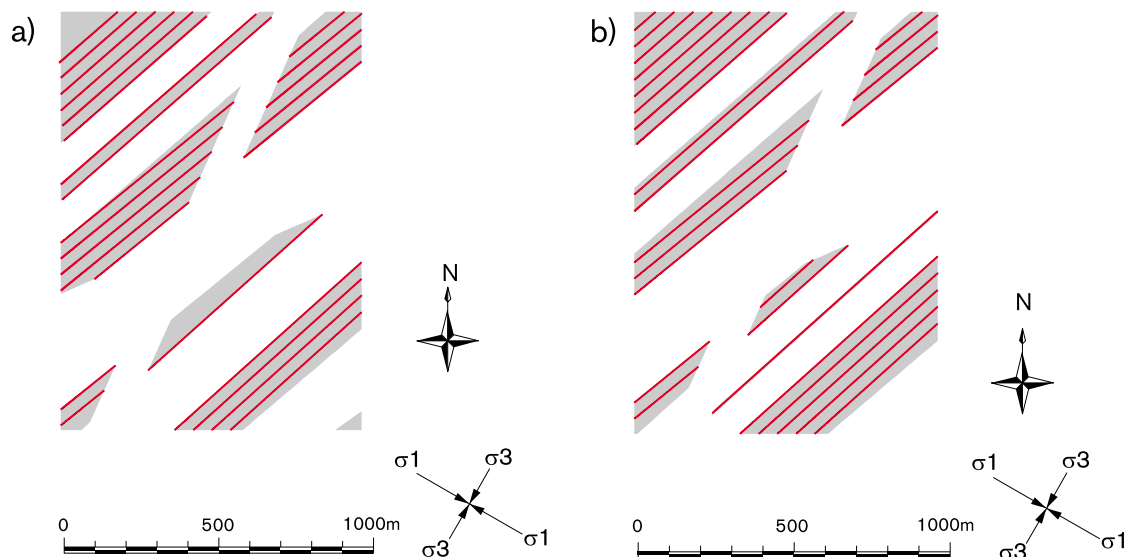
Gideå (Ceberg)

Gideå undersöktes under åren 1981–1983. Området var ett av fyra som studerades för att få underlag till KBS-projekten.

Den topografiska reliefen i regionen kring Gideå varierar från havsnivå till cirka 300 meter. Den är därmed betydligt större än för Äspö och Finnsjön. Gideåområdet ligger cirka 100 meter över havet och inom en större höjdpåta. Avståndet till havet är cirka 10 km. Naturmässigt dominerar skog, mossar och myrar. Landhöjningen är cirka 8 mm/år.

Bergartsmässigt domineras regionen av sedimentär gnejs (metagråvacka) som bildades för cirka 1 950–1 870 miljoner år sedan. Även äldre och yngre granit finns som stora massiv i regionen. Den yngsta bergarten är lagergångar och brantstående gångar av diabas med en ålder av 1 270–1 215 miljoner år. Inom Gideåområdet dominerar sedimentär gnejs samt partier med äldre granit. Genom dessa skär ett system av öst-västliga, brantstående diabasgångar som kan vara upp till 15 meter breda. Gnejsens foliationsriktning varierar, men är i huvudsak öst-väst med en medelbrant stupning.

Frekvensen av tolkade och observerade sprickzoner inom Gideå är relativt måttlig.



Figur 2-4. Försvarsutformning för Aberg. Figuren visar snitt på a) 500 och b) 600 meters djup.

Sprickzonernas transmissivitet är lägre än för de båda andra platserna och varierar mellan cirka 10^{-5} m²/s och 10^{-8} m²/s. Även den hydrauliska konduktiviteten i bergmassan mellan sprickzonerna är förhållandesvis låg, och i medeltal omkring 10^{-10} m/s på nivåer under 100 meters djup.

Gideå ligger under högsta kustlinjen, vilket innebär att området efter den senaste istiden var täckt av vatten. De högsta delarna av området steg upp ur havet för cirka 8 000–6 000 år sedan. Havet var då sött eller svagt salt. I två provtagna sektioner finns även svagt salt grundvatten. Övriga sektioner har sött vatten.

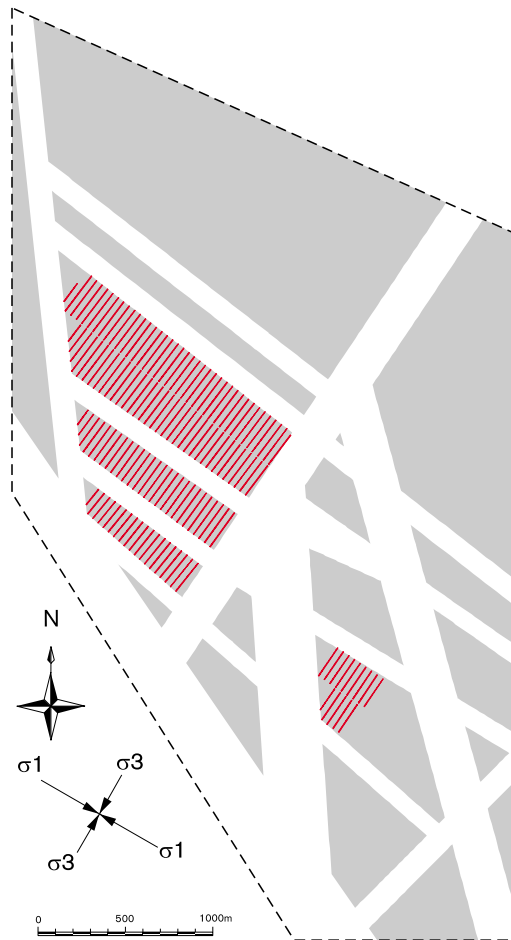
2.5.3 Platsanpassade försvarsutformningar

Utformning av berggrum, tunnlar och deponeringspositioner i försvarssystemet bygger på principer som först presenterades i KBS-3-studien. För Aberg, Beberg och Ceberg har ett antal möjliga försvarsplaceringar tagits fram och huvudalternativet för respektive plats redovisas nedan.

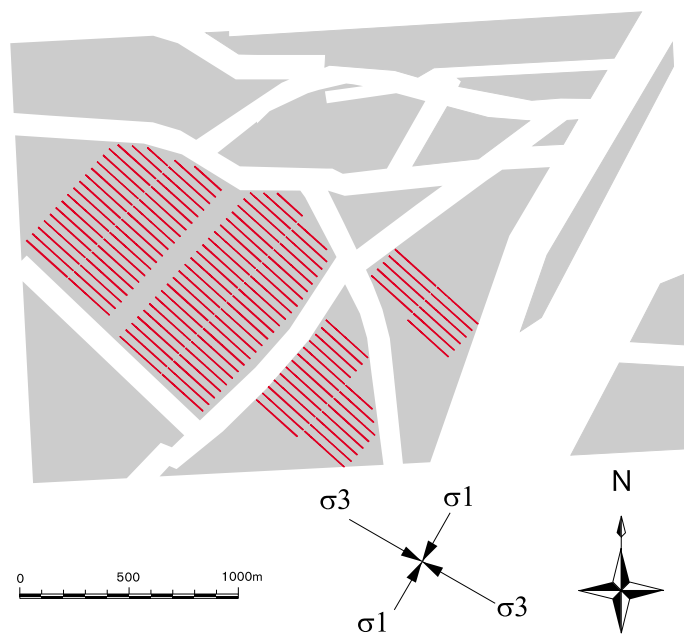
I Aberg är den föreslagna försvarsutformningen uppdelad på två nivåer på 500 m och 600 m djup för att rymma hela förvaret inom det relativt begränsade undersökningsområdet, se figur 2-4.

I Beberg är förvaret placerat 600 m under havsnivå för att med marginal undvika en dominerande horisontell struktur, se figur 2-5. Deponeringstunnlarna är placerade vinkelrätt mot största horisontalspänningen. Riktningen har valts för att undvika långa skärningar med vattenförande sprickor som har samma riktning som horisontalspänningen. Utformningen liknar den som användes som exempel i säkerhetsanalysen SKB 91.

I Ceberg föreslås förvaret placeras 500 m under havsnivå, dvs omkring 600 m under markytan, se figur 2-6. Deponeringstunnlarna är placerade vinkelrätt mot största horisontalspänningen.



Figur 2-5. Förvarsutformning för Beberg med deponeringstunnlar orienterade vinkelrätt mot den största horisontalspänningen. Djupet är 600 m.



Figur 2-6. Förvarsutformning för Ceberg med deponeringstunnlar orienterade vinkelrätt mot den största horisontalspänningen. Djupet är 500 meter.

2.5.4 THMC-beskrivning av processer och variabler

I den fullständiga THMC-beskrivningen av geosfären är viktiga platsberoende variabler bl a sprickstrukturen, grundvattensammansättning och bergspänningar. Viktiga geosfärsrelaterade processer är grundvattenströmning, de mekaniska processer som avgör bergets långsiktiga stabilitet och de kemiska transport- och reaktionsprocesser som avgör grundvattensammansättningen på sikt och därmed den kemiska miljön för buffert och kapsel.

2.6 Säkerhetskriterier

Enligt avsnitt 1.8.1 beskriver säkerhetsanalysen vilka förändringar förvarssystemet genomgår med tiden och vilka säkerhetsmässiga konsekvenser detta får. De övergripande säkerhetsfunktionerna för ett djupförvar gäller dess isolerande och fördröjande förmågor. Acceptanskriterierna säger att risken för skadeverkningar inte får överstiga 10^{-6} per år, se avsnitt 1.5.1.

Ett övergripande mål för säkerhetsanalysen är därför att utreda huruvida detta är uppfyllt. Kriteriet är generellt och inte knutet till någon speciell förvarsutformning. Baserat på utformningen av KBS-3-systemet och dess avsedda långsiktiga funktioner kan mer specifika ”hjälpkriterier” för den långsiktiga säkerheten formuleras. Dessa avgör inte på ett direkt sätt säkerheten utan är snarare en ”hjälp på vägen” i själva säkerhetsanalysen.

Kapseln

Ett första säkerhetskriterium är att kapseln långsiktigt ska vara tät, dvs att dess kopparhölje förblir obrutet.

Dessutom finns kriteriet att temperaturen på kapselytan inte får överstiga 100 °C för att undvika kokning på kapselytan. Kokning skulle kunna leda till anrikning av salter på ytan vilket i sin tur kan ge korrosionseffekter som är svåra att analysera.

För kapseln finns också **konstruktionskrav** som ställs bl a med tanke på att isoleringen ska hålla under lång tid. Konstruktionskraven är till hjälp då kapselns material och dimensioner väljs, men används inte direkt i säkerhetsanalysen.

Bufferten

Även för bufferten finns diverse krav som används då lämpliga material och dimensioner bestäms. Få av dessa används direkt i säkerhetsanalysen. I stället utvärderas den valda buffertens funktion under de olika förhållanden som kommer att råda i scenarierna.

Buffertens övergripande uppgift är att utgöra en diffusionsbarriär mellan kapsel och berg. För att uppfylla detta måste bufferten dels ha en låg hydraulisk konduktivitet (vattenledningsförmåga), dels förmågan att hålla kapseln centrerad i deponeringshålet under lång tid. Den måste också ”självläka” mindre sprickor i leran som kan uppkomma t ex initialt vid mättnadsprocessen.

Återfyllningen

För återfyllningen finns de långsiktiga säkerhetskriterierna att den ska ha en hydraulisk konduktivitet som inte väsentligt överstiger det omgivande bergets genomsnittliga konduktivitet, samt ett svälltryck om minst 0,1 MPa mot tunneltaket för att utgöra ett stöd för berget kring tunnarna.

Geosfären

För geosfären finns kriteriet att grundvattnet på förvarsdjup långsiktigt ska vara syrefritt. Detta krävs dels för att undvika syrekorrosion av kopparhöljet men också för att det förenklar analysen av den kemiska utvecklingen i allmänhet.

I övrigt är det svårt att formulera kriterier för geosfären som är direkt användbara i säkerhetsanalysen. Geosfären bidrar förvisso till olika säkerhetsfunktioner: Dess mekaniska stabilitet är viktig för isoleringen, grundvattensammansättningen har betydelse för korrosionsprocesser och därmed isolering etc. Problemet vad gäller kriterier är att många olika mätbara egenskaper tillsammans på ett komplext sätt bidrar till geosfärens funktioner. Kriterier av de slag som formulerats ovan för kapsel och buffert används därför inte för geosfären då den långsiktiga utvecklingen studeras i säkerhetsanalysen.

Vid platsundersökningar kan det däremot vara meningsfullt att formulera både krav och önskemål på olika aspekter av geosfärens initiala tillstånd, dvs på förhållanden som direkt eller indirekt kan observeras vid undersökningar av möjliga förvarsplatser.

Säkerhetskriterier och variabler

Säkerhetskriterierna ger begränsningar på en rad variabler (kopparhöljets geometri, temperaturen på kapselytan, buffertens svälltryck och smektithalt, syrehalten i grundvattnet) som inte bör överskridas långsiktigt då förvarets utveckling analyseras. Smektithalt och svälltryck kommer t ex att påverkas genom att den kemiska utvecklingen leder till materialförändringar i bufferten, kapselytan värms på grund av effektutvecklingen i bränslet etc.

Det övergripande kriteriet är dock alltid de begränsningar av utsläpp från förvaret som formuleras av säkerhets- och strålskyddsmyndigheter.

2.7 Fullständigheten i systembeskrivningen

En viktig fråga för säkerhetsanalysen är huruvida alla relevanta processer är identifierade i systembeskrivningen. Det kan aldrig i strikt mening bevisas att systembeskrivningen är fullständig, dvs att den innehåller alla relevanta processer och samband för förvarets utveckling. Tilltron till systembeskrivningens fullständighet måste i stället bli föremål för bedömning.

Till grund för en sådan bedömning kan ligga både generella argument om naturvetenskapens mognad och specifika argument som rör systembeskrivningens uppbyggnad i en säkerhetsanalys.

Mycket av förståelsen av systemet vilar på naturvetenskapliga fundament som i många fall under lång tid förblivit oförändrade. Det gäller t ex kunskap om radioaktivitet, termodynamik eller hydrodynamik (grundvattenströmning). Till detta kommer ett par decennier av forskning och utveckling kring tekniska och naturvetenskapliga frågor som specifikt rör djupförvaret. Det internationella utbytet av erfarenheter är en viktig del i uppbygganden av förståelsen av förvarssystemets utveckling.

Konkreta administrativa åtgärder som kan vidtas för att nå fullständighet i en systembeskrivning är:

- Databashantering och annan systematisk dokumentation av alla processer som över tiden identifierats som viktiga för förvarets utveckling.
- Jämförelser med databaser upprättade av andra organisationer och inom internationella samarbeten.

Förutom en välutvecklad naturvetenskaplig kunskapsbas och en avancerad databashantering av relevant information krävs även en hög kompetens hos de experter som genomför systembeskrivning och säkerhetsanalys. Kompetens krävs både i metodik och förståelse av förvarssystemets funktion.

Även om fullständigheten inte kan bevisas kan konsekvenserna av en ofullständig beskrivning i viss mån illustreras. Antag t ex att en process som på kort tid bryter ned kopparkapseln vore oidentifierad. Konsekvenserna av detta kan illustreras genom att genomföra en beräkning av radionuklidtransport där kapselns isolering tänks vara helt förlorad säg 1 000 år efter förslutning. Sådana beräkningsfall redovisas i kapseldefektscenariot.

Uppbyggningen av systembeskrivningen i SR 97, med val av processer etc beskrevs kort i avsnitt 2.1.1. Det är SKB:s bedömning att alla viktiga processer i förvarssystemets utveckling finns representerade i systembeskrivningen.

3 Scenarier

3.1 Val av scenarier

Med systemet av processer givet i systembeskrivningen blir förvarets utvecklingsväg bestämd om

- a) ett initialt tillstånd och
- b) de långsiktiga förhållandena i omgivningen

kan fastställas. Både initialtillstånd och omgivningsförhållanden är emellertid behäftade med osäkerheter.

De yttre förhållanden som råder idag kan vi observera och beskriva. Det gäller t ex biosfärens utseende ovanför förvaret, klimatet, förhållandet i avlägsna delar av geosfären och samhällets struktur. Däremot råder stor osäkerhet om hur klimat, biosfär och framför allt samhälle kan komma att förändras i framtiden. Ändå måste konsekvenserna för förvaret av sådana förändringar analyseras. Metoden som används för detta är att analysera förvarets utveckling för en rad olika tänkbara framtida förhållanden i omgivningen. Man analyserar en uppsättning olika scenarier.

I SR 97 analyseras fem scenarier. Urvalet är baserat på erfarenheter från tidigare arbete med sk interaktionsmatriser, på information i databaser över faktorer och förhållanden som är relevanta för säkerheten samt på systembeskrivningen. Dessutom har erfarenheter från tidigare säkerhetsanalyser av SKB och andra organisationer utnyttjats. Valet är en expertbedömning av vilka förhållanden initialt och i omgivningen som är viktiga att belysa i en säkerhetsanalys.

De valda scenarierna för SR 97 är:

- Ett basscenario där förvaret tänks vara byggt enligt specifikationer, där inga kapslar har initiala fel och där dagens förhållanden i omgivningen tänks bestå.
- Ett kapseldefektscenario som skiljer sig från basscenarioet genom att ett fåtal kapslar tänks vara behäftade med initiala fel.
- Ett klimatscenario som behandlar framtida klimatförändringar.
- Ett jordskalvsscenario.
- Ett scenario som behandlar framtida mänskliga handlingar som kan tänkas påverka djupförvaret.

Valet av scenarier i SR 97 baseras på systembeskrivningen och erfarenheter från tidigare arbete. Figur 3-1 visar översiktligt de olika scenarierna.

Basscenario

| Bränsle | Gjutjärnsinsats/ Kopparkapsel | Buffert/Återfyllning | Geosfär | Omgivning |
|--|----------------------------------|----------------------|---------|---|
| Initialt: • Förvaret byggt enligt specifikationer vid Aberg, Beberg och Ceberg | | | | <ul style="list-style-type: none"> • Dagens klimat består • Pågående landhöjning • Dagens biosfär, påverkad av landhöjning • Inga jordskalv • Inga mänskliga intrång |

Kapseldefektscenario

| Bränsle | Gjutjärnsinsats/ Kopparkapsel | Buffert/Återfyllning | Geosfär | Omgivning |
|---|----------------------------------|----------------------|---------|--|
| Initialt: • Ett fåtal kapslar har tillverkningsfel • Förvaret i övrigt byggt enligt specifikationer vid Aberg, Beberg och Ceberg | | | | <ul style="list-style-type: none"> • Som basscenariot |

Klimatscenario

| Bränsle | Gjutjärnsinsats/ Kopparkapsel | Buffert/Återfyllning | Geosfär | Omgivning |
|---|----------------------------------|----------------------|---------|---|
| Initialt: • Förvaret byggt enligt specifikationer vid Aberg, Beberg och Ceberg Variant: • Ett fåtal kapslar har tillverkningsfel | | | | <ul style="list-style-type: none"> • Klimatförändringar • Klimatpåverkad biosfär • I övrigt som basscenariot |

Tektonik/jordskalvsscenario

| Bränsle | Gjutjärnsinsats/ Kopparkapsel | Buffert/Återfyllning | Geosfär | Omgivning |
|--|----------------------------------|----------------------|---------|--|
| Initialt: • Förvaret byggt enligt specifikationer vid Aberg, Beberg och Ceberg | | | | <ul style="list-style-type: none"> • Jordskalv • I övrigt som basscenariot |

Intrångsscenario

| Bränsle | Gjutjärnsinsats/ Kopparkapsel | Buffert/Återfyllning | Geosfär | Omgivning |
|--|----------------------------------|----------------------|---------|--|
| Initialt: • Förvaret byggt enligt specifikationer vid Aberg, Beberg och Ceberg | | | | <ul style="list-style-type: none"> • Mänskliga intrång • I övrigt som basscenariot |

Figur 3-1. De olika scenarierna i SR 97.

I SR 97 utgör basscenariot en jämförelsegrund för övriga scenarier. Dagens klimat antas råda trots att det är känt att klimatet varierar långsiktigt. En annan möjlighet vore att inkludera framtida klimatförändringar i basscenariot i strävan efter en mer realistisk jämförelsegrund. Detta har inte gjorts i SR 97 av följande skäl:

- Det råder idag inte enighet bland forskare och experter om vilka förändringar som är att förvänta. Detta gäller inte bara den omdebatterade växthuseffekten. Även bedömningar om tidpunkt för och framför allt omfattning av kommande perioder av kallare klimat är osäkra.
- Det är relativt enkelt att beskriva den påverkan dagens klimat har på förvarssystemet. Därmed hamnar fokus i basscenariot på förvarets inre utveckling. Detta ger en gradvis uppbyggnad av komplexiteten i analysen av förvarets utveckling: Först analyseras utvecklingen vid enkla randförhållanden i basscenariot och sedan för mer komplexa i klimatscenariot. Detta bör dels vara en pedagogisk vinst, dels möjliggöra en tydligare bedömning av vilka inre och yttre faktorer som kan störa förvarets funktion.
- SSI:s föreskrifter anger explicit att redovisningen av säkerheten ska omfatta ett fall där biosäkerhetsförhållandena inte ändras.

Det finns däremot inget som i princip hindrar att klimatförändringar (eller andra förändringar i omgivningen) inkluderas i basscenariot.

3.1.1 Fullständighet/täckningsgrad i scenariovalet

Liksom det inte går att bevisa att systembeskrivningen är fullständig är det omöjligt att bevisa att alla tillstånd i omgivningen som kan påverka förvaret har identifierats. Tilltron till att scenariernas gemensamma täckning är tillräcklig för att analysera djupförvarets säkerhet måste istället bedömas.

Viktiga åtgärder för att nå fullständighet i scenariovalet är att

- för varje process i systembeskrivningen ställa frågan om denna direkt kan påverkas av det initiala tillståndet eller den yttre omgivningen,
- för varje variabel i systembeskrivningen bedöma huruvida osäkerheter i det initiala värdet föranleder val av specifika scenarier eller varianter,
- systematiskt dokumentera de omgivningsförhållanden som över tiden identifierats som viktiga för förvarets utveckling,
- jämföra med scenarioval och databaser upprättade av andra organisationer och inom internationella samarbeten.

Scenariovalet i SR 97 baseras i princip på alla dessa punkter. Systembeskrivningen, databaser och erfarenheter från tidigare säkerhetsanalyser av SKB och andra organisationer har utnyttjats.

Osäkerheter i initialtillståndet har i scenariovalet hanterats på följande sätt:

- För **bränslet** har inga osäkerheter i det initiala tillståndet bedömts vara så avgörande för utvecklingen att de bör hanteras i ett eget scenario. Osäkerheter i t ex radionuklidinventarium och resteffekt kan vid behov analyseras som varianter av basscenariot (termisk utveckling) och kapseldefektscenariot (radionuklidtransport).
- För **kapseln** rör osäkerheterna framför allt den initiala tätheten. Detta hanteras genom att analysera effekterna av initiala skador i ett eget scenario.

- För **buffert och återfyllning** har inga osäkerheter i det initiala tillståndet bedömts vara så avgörande att de hanteras med egna scenarier. SR 97 omfattar inte analys av missöden vid tillverkning eller deponering av buffert. Sådana ”buffertdefekter” bör kunna undvikas genom lämpliga kontrollrutiner vid tillverkning och deponering av bufferten. Effekterna bedöms dessutom bli betydligt mindre än de av initiala kapsel-skador. Om man i kommande analyser ändå skulle välja att studera konsekvenserna av ”buffertdefekter” kan det lämpligen göras som en variation inom i första hand basscenariot.
- För **återfyllningen** gäller att återfyllningsmaterialet ska anpassas till de grundvattenkemiska förhållandena på förvarsplatsen, framför allt salthalten. Någon sådan platsspecifik anpassning, och därmed platsspecifik beskrivning av återfyllningens initialtillstånd, har inte gjorts i SR 97. Analyserna av återfyllningens långsiktiga utveckling och funktion är ibland förenklade. Eventuella behov av att belysa osäkerheter i återfyllningens initialtillstånd görs lämpligen som variationer inom basscenariot i kommande säkerhetsanalyser.
- För **geosfären** finns stora osäkerheter i initialtillståndet bl a vad gäller sprickstrukturen och den rumsliga fördelningen av hydrauliska egenskaper både för sprickzoner och bergmassa. Osäkerheterna har bl a betydelse för analysen av radionuklidtransport i kapseldefektscenariot. Osäkerheterna hanteras genom att studera en rad varianter i de detaljerade hydrauliska analyserna av geosfären i kapseldefektscenariot.

SKB bedömer att de valda scenarierna ger en god täckning av framtida utvecklingsvägar för djupförvaret. Detta hindrar inte att scenariovalet i kommande analyser kan komma att modifieras något.

3.2 Basscenario

I basscenariot beskrivs den förväntade utvecklingen för fallet då förvaret är byggt enligt specifikationer och förhållandena i omgivningen antas vara i princip oföränderliga och lika med dagens. Alla kapslar postuleras vara utan tillverkningsfel och dagens klimat antas råda framgent.

Baserat på tidigare säkerhetsanalyser kan kapslarna förväntas hålla under mycket lång tid med dessa förutsättningar. Därför bör radionuklidtransport inte behöva behandlas i basscenariot. Detta är dock ingen förutsättning utan måste visas genom de analyser som görs för scenariot.

I basscenariot är det övergripande syftet att studera kapselns isolerande funktion. Ett övergripande krav på förvarssystemet är att kapslarnas kopparhöljen förblir obrutna. Om detta krav är uppfyllt är det ensamt tillräckligt för att visa säkerheten. För att underlätta analysen ställs också andra krav som redovisas i avsnitt 2.6.

3.2.1 Initialtillstånd och randförhållanden

För initialtillståndet antas förvaret vara byggt enligt specifikation och samtliga deponerade kapslar postuleras vara utan tillverkningsfel. I sammanfattning antas i basscenariot följande om förvarets omgivning:

- Dagens klimatförhållanden antas råda framgent.

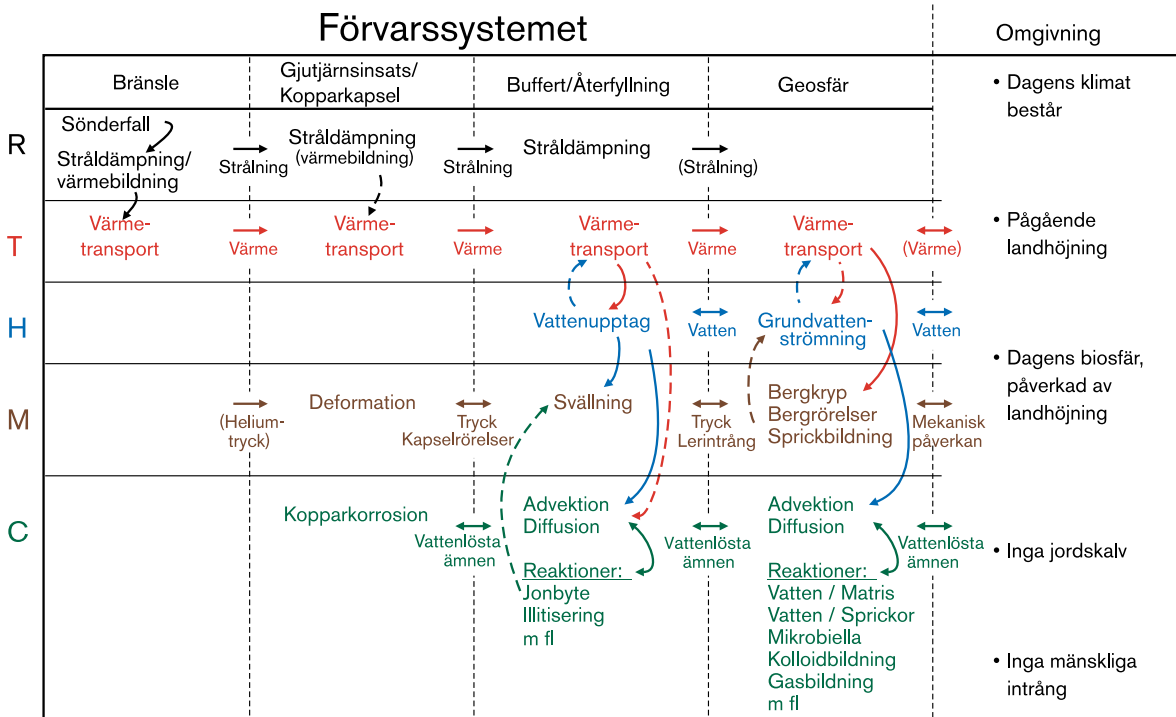
- Landhöjning och den inverkan detta har på framför allt biosfären inkluderas i basscenariot. Inverkan på grundvattenflödet diskuteras översiktligt.
- Dagens platsspecifika biosfärer antas bestå förutom de effekter landhöjningen har på biosfären.
- Bergmekaniska förändringar sker endast till följd av aseismiska processer dvs jordskalv inkluderas inte i basscenariot.
- Inga mänskliga intrång i förvaret förekommer.

3.2.2 Överblick av processer och beroenden

Förvarets initiala tillstånd förändras över tiden av en rad processer som äger rum i bränsle, kapsel, buffert/återfyllning och geosfär. Processerna kan delas in i kategorierna strårelaterade (R), termiska (T), hydrauliska (H), mekaniska (M) och kemiska (C). I figur 3-2 ges en förenklad bild av systemet av processer.

Många processer sker parallellt och kopplat och situationen kan därför te sig mycket komplex. En närmare analys av vilka väsentliga kopplingar som finns i systemet visar dock tydliga huvuddrag som avsevärt förenklar hanteringen i säkerhetsanalysen.

De strårelaterade processerna (radioaktivt sönderfall och stråldämpning) bestämmer hur strålintensiteten ser ut i förvarets olika delar. Dessa är i stort sett oberoende av alla andra typer av processer och kan därför beskrivas först.



Figur 3-2. Huvuddragen i processsystemet för basscenariot.

Sedan de strålrelaterade processerna kvantifierats kan förvarets termiska utveckling till väsentliga delar bestämmas. Det radioaktiva sönderfallet utgör källan till uppvärmningen och den vidare utvecklingen styrs av värmetransporten i de olika förvarsdelarna. Värmetransporten beror av materialegenskaper hos förvarsdelarna som i stort sett är oföränderliga över långa tider. Ett undantag av betydelse finns: Buffertens termiska egenskaper beror av dess vattenhalt, som ändras under buffertens vattenmättnadsförlopp.

Den hydrauliska utvecklingen i basscenariot rör endast bufferten och geosfären eftersom kapselns inre och bränslet är hydrauliskt isolerade av kopparhöljet. I geosfären förväntas de ursprungliga flödesförhållanden återställas inom en tidsperiod på tio upp till etthundra år efter att förvaret förslutits. Vattenmättnadsförloppet i buffert/återfyllning beror av tillrinningen av grundvatten till enskilda deponeringshål respektive tunnlar. För bufferten finns alltså också ett samspel med den termiska utvecklingen.

Därefter kan förvarets mekaniska utveckling bestämmas. Bränslet är mekaniskt isolerat från omgivningen av gjutjärnsinsatsen. Den mekaniska utvecklingen domineras till att börja med av svällningen i bufferten, som bestäms av buffertens vattenhalt, och bergets värmeutvidgning som bestäms av temperaturutvecklingen i berget. Buffertens svällning leder till en mekanisk påverkan på både kapsel och berg. Långsiktigt styrs den mekaniska utvecklingen bl a av storskaliga förändringar i geosfären.

Slutligen kan förvarets kemiska utveckling beskrivas. Även i kemiskt avseende är bränslet och kapselns inre isolerade från omgivningen av kopparhöljet. Den kemiska utvecklingen domineras av reaktions- och transportprocesser i buffert och geosfär samt av korrosion av kopparkapselns utsida.

I följande avsnitt beskrivs i tur och ordning förvarets strålrelaterade, termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska utveckling.

3.2.3 Strålrelaterad utveckling

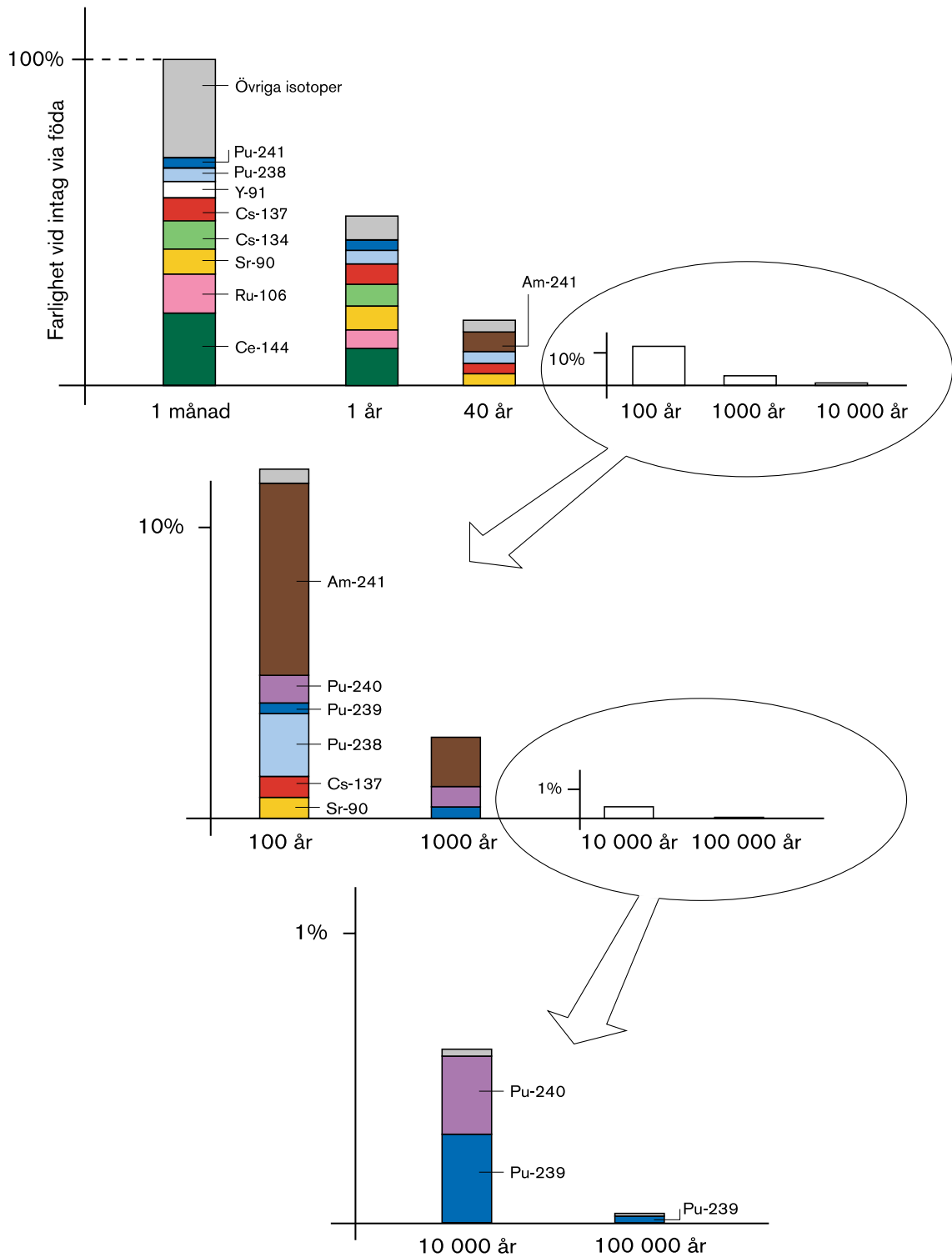
Den strålrelaterade utvecklingen omfattar radioaktivt sönderfall i bränslet, den strålning detta ger upphov till samt spridning och dämpning av strålningen i bränsle, kapsel och buffert.

I basscenariot redovisas:

- Bränslets innehåll av radionuklider och dess farlighet som funktion av tid.
- Effektutvecklingen i bränslet till följd av radioaktiva sönderfall.
- Nivåerna av γ - och neutronstrålning i bränsle, kapsel och buffert.

Betydelse för säkerheten: Den strålrelaterade utvecklingen omfattar inga processer som direkt berör förvarets isolerande förmåga. Strålningen påverkar inte kapselns eller buffertens materialegenskaper på sikt. Resultaten används som indata till andra delar av analysen. Resteffekten utgör källan till den termiska utvecklingen och strålningen kan bl a ge radiolyseffekter i buffertens porvatten i basscenariot.

Som exempel på resultat visas i figur 3-3 hur farligheten utvecklas i tiden för det använda bränslet.



Figur 3-3. Relativ farlighet vid intag via föda för BWR-bränsle med en utbränningsgrad av 38 MWd/kg uran.

Tilltro

Processförståelse: De grundläggande processerna i den strålrelaterade utvecklingen, radioaktivt sönderfall och stråldämpning, är väl förstådda både experimentellt och teoretiskt, se Processrapporten.

Modeller: Utvecklingen av radioaktivitet, farlighet och resteffekt kan beräknas analytiskt när innehållet av radionuklider vid deponeringen är känd. Modeller för strålskärmsberäkning ger en tillräckligt detaljerad behandling av stråldämpningen.

Data: Den strålrelaterade utvecklingen kräver sönderfallsdata och inventarier av radionuklider i bränslet samt strålskärmsdata för bränsle-, kapsel- och buffertmaterialen. Kvaliteten i tillgängliga data är fullt tillräcklig för de beräkningar som genomförs i basscenariot. Osäkerheter i radionuklidinventariet diskuteras i Datarapporten.

Slutsatser

Den strålrelaterade utvecklingen har ingen direkt bäring på säkerheten i basscenariot. Beräkningsresultaten används i andra analyser, framför allt används resteffekten i analysen av den termiska utvecklingen.

Den grundläggande förståelsen för inblandade processer är god liksom kvaliteten i tillgängliga modeller och data.

3.2.4 Termisk utveckling

Den termiska utvecklingen beskriver hur värme transporteras från bränslet och ut till förvarets övriga delar. I basscenariot redovisas

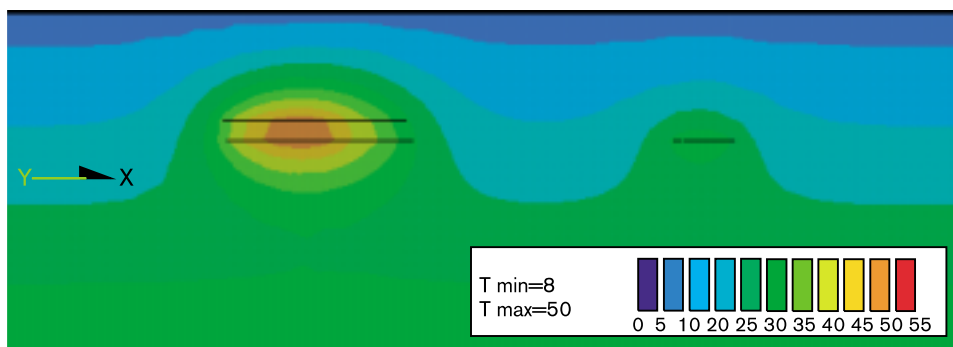
- En analys av temperaturen på kapselns utsida, som inte får överstiga 100 °C. Kravet är satt för att undvika kokning på kapselytan. Kokning skulle kunna leda till anrikning av salter på ytan vilket i sin tur kan ge korrosionseffekter som är svåra att analysera.
- Temperaturen i hela förvarssystemet som funktion av tid för att användas i framför allt de mekaniska och kemiska analyserna. Temperaturpåverkan vid markytan ovanför förvaret behöver också uppskattas.

Betydelse för säkerheten: Den termiska utvecklingen omfattar inga processer som direkt berör förvarets isolerande förmåga. Resultaten används i de mekaniska och kemiska analyserna.

Resultat

Baserat på resteffekten i bränslet samt termiska och geometriska data för samtliga förvarsdelar beräknas temperaturutvecklingen. Vid beräkningen antas pessimistiskt att bufferten ännu inte hunnit vattenmättas genom vattenupptag från det omgivande berget samt att det finns en luftfylld spalt mellan kapsel och buffert.

Resultaten visar att kapseln når sin maximala temperatur omkring 10 år efter deponering. Kapselns yttemperatur ligger alltid under 90 °C. Resultatet är förväntat eftersom förvarsutformningen är vald med hjälp av termiska beräkningar för att säkerställa just detta. Säkerhetsmarginalen om 10 °C till kravet 100 °C är satt för att ge utrymme för osäkerheter i indata.



Figur 3-4. Temperaturen i ett vertikalt snitt vid Aberg 1 000 år efter deponeringsstart. De horisontella svarta strecken markerar förvaret. Toppen i figuren svarar mot markytan.

I geosfären beräknas temperaturen plats specifikt som funktion av tid och rum. Temperaturen vid deponeringshålens vägg blir maximal efter cirka 20 år och uppgår då till cirka 60, 50 och 45 °C i Aberg, Beberg respektive Ceberg. Sett över hela förvarets bergvolym nås den maximala temperaturen då värmevågor från olika tunnlar interfererar och i Aberg då värme från de två förvarsplanen överlagras. Maximal medeltemperatur i bergblocken mellan förvarsplanen i Aberg blir cirka 55 °C och nås efter 450 år. Motsvarande temperaturer i förvarsplanen i Beberg och Ceberg är 45 respektive 40 °C och nås efter 90 respektive 80 år. Figur 3-4 visar temperaturen i ett vertikalt snitt vid Aberg efter 1 000 år.

Värme från förvaret når markytan efter några hundra år. Värmen kommer att ha marginell inverkan på de termiska förhållandena på markytan. Effekten är jämförbar med det naturliga geotermiska värmeflödet vilket i sin tur är mindre än en promille av effekttillförseln vid solsken.

Tilltro

Processförståelse: Den grundläggande förståelsen av olika värmetransportfenomen är god för såväl kapsel, buffert som berg, se Processrapporten.

Modeller: Tillgängliga modeller representerar tillräckligt väl värmetransport i förvarets olika delar. För geosfären finns fullgoda både analytiska och numeriska modeller.

Data: Analysen kräver data om resteffekt för bränslet (från strårelaterad utveckling) liksom termiska och geometriska data för kapsel och buffert. Dessutom krävs plats-specifika termiska data för geosfären. I allmänhet är data om värmeöverföring mellan olika medier, t ex gjutjärnsinsats och kopparkapsel eller kapsel och buffert, mer osäkra än värmeledningsdata inom ett medium.

Dataosäkerheter hanteras pessimistiskt vid uppskattningen av kapselns yttemperatur. I övrigt är kvaliteten hos data tillräckligt för de beräkningar som krävs i basscenariot.

Slutsatser

Kravet att kapselns yttemperatur inte får överstiga 100 °C kan alltid uppnås med nödvändig säkerhetsmarginal genom att välja lämpliga avstånd mellan deponeringshålen eller genom att anpassa bränsleinnehållet i kapslarna. Kravet verifieras genom standardiserade temperaturberäkningar där dataosäkerheter hanteras pessimistiskt.

Beräkningar av den termiska utvecklingen i övrigt kan genomföras med tillräcklig precision. Resultaten har ingen direkt bäring på säkerheten utan används i framför allt beskrivningen av den mekaniska och den kemiska utvecklingen.

3.2.5 Hydraulisk utveckling

Den hydrauliska utvecklingen i basscenariot berör bara buffert/återfyllning och geosfär så länge kapseln är intakt. Kapselns inre och bränslet är hydrauliskt isolerade av den intakta kapseln.

Den hydrauliska utvecklingen i basscenariot beskriver hur vatten och gas transporteras i geosfärens spricksystem och i porsystemet i buffert/återfyllning.

I basscenariot behövs:

- en redovisning av den platsspecifika hydrauliska utvecklingen i geosfären samt,
- en mer detaljerad beskrivning av den hydromekaniska utvecklingen då buffert/återfyllning vattenmätas.

Betydelse för säkerheten: Den hydrauliska utvecklingen i geosfären berör indirekt kapselns isolerande förmåga eftersom grundvattnet transporterar vattenlösta ämnen och därmed påverkar kemiska förlopp som kapselkorrosion.

Buffertens hydrauliska utveckling berör inte direkt kapselns isolerande förmåga. Det är dock viktigt att säkerställa att bufferten mätas under alla förhållanden för att den långsiktigt ska fungera som avsett i förvaret. Dessutom är det viktigt att studera svälltryckets uppbyggnad då bufferten mätas, bl a för att kunna bedöma vilka påfrestningar ett eventuellt ojämnt svälltryck ger på kapseln.

Grundvattenflöde

Initialt är geosfären delvis dränerad till följd av byggnationen. Återgång till ursprungliga grundvattennivåer och flödesmönster sker successivt i takt med att olika delar av förvaret byggs och efter deponering återfylls och försluts.

I geosfären nås ett mer eller mindre konstant flödestillstånd efter att grundvattennivån återgått till den ursprungliga.

I basscenariot redovisas modellstudier av det ostörda, naturliga regionala grundvattenflödet vid de tre förvarsplatserna. Här diskuteras flödesmönster, dominerande strömningsvägar, flöden på förvarsdjup, betydelsen av densitetsvariationer orsakade av varierande salthalt mm. Mer detaljerade, lokala flödesstudier redovisas i kapseldefektscenariot.

Dessutom diskuteras kort den förväntade långsiktiga utvecklingen vid de tre platserna. Förändringarna blir störst vid ön Aberg som om cirka 2 000 år bedöms övergå till att bli en del av fastlandet till följd av landhöjningen. En modellstudie förutsäger bl a något ökade flöden och en förändring mot sötare vatten i ett tiotusenårigt perspektiv.

Processförståelsen är god och kvaliteten i modeller och data för den hydrauliska utvecklingen i basscenariot bedöms som tillräcklig. En utförligare diskussion finns i kapseldefektscenariot, avsnitt 3.3.5.

Hydromekanisk utveckling i buffert/återfyllning

Buffert och återfyllning är vid deponeringen delvis vattenmättade. Efter deponeringen kommer de med tiden att mättas med vatten från det omgivande berget. Mättnadsförloppet i bufferten, med dess koppling till de termiska (värmeflödet från kapseln) och mekaniska (svälltrycket) utvecklingarna studeras i en integrerad modellering.

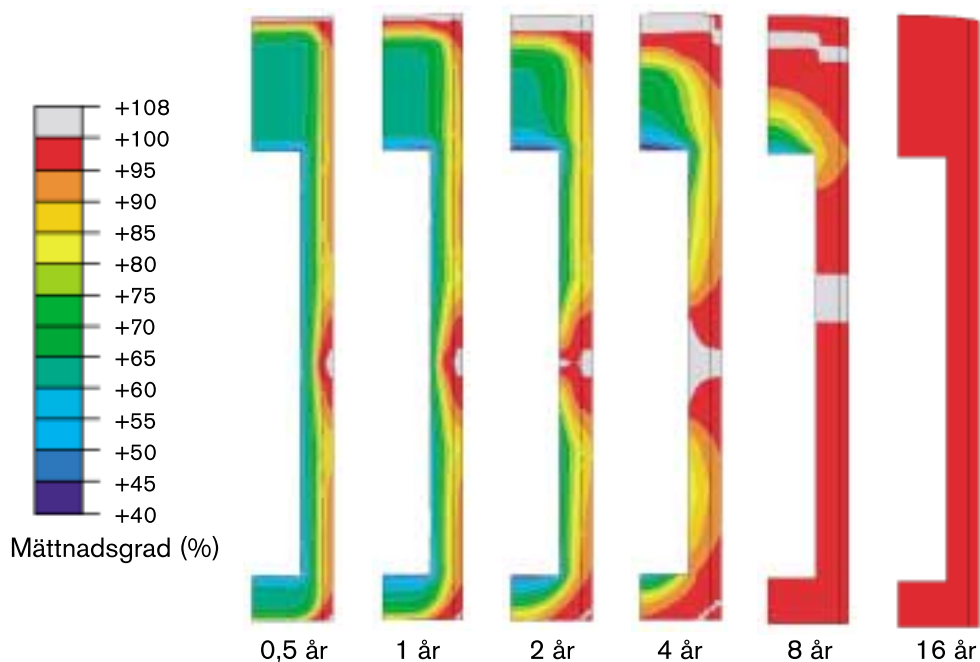
Ett typiskt fall redovisas liksom flera varianter med bl a olika antaganden om de hydrauliska egenskaperna i geosfären, och om vattenförande sprickor som skär deponeringshålet. Figur 3-5 visar vattenmättnadsgraden vid olika tider för det typiska fallet. Full vattenmättnad nås här efter cirka 12 år.

Även tryckuppbyggnad och rörelser hos kapseln och bufferten beräknas i modellen. Beräkningarna visar att kapseln rör sig uppåt ungefär en centimeter i bufferten och återgår efter cirka 10 år till utgångsläget. Bufferten tränger permanent in cirka 8 centimeter i deponeringstunnlarnas återfyllning.

Tiden för att uppnå full vattenmättnad ligger mellan 6 och 35 år för samtliga variationer, utom för en där bergmassan har extremt låg vattenledningsförmåga. Skillnaden saknar praktisk betydelse för förvarets fortsatta funktion. I fallet med den extremt låga konduktiviteten förväntas bufferten mättas genom vattentillförsel från återfyllningen, men detta förlopp har inte modellerats.

Den detaljerade utvecklingen i spalten mellan kapsel och buffert under mättnadsförloppets inledande skede är osäker. Detta leder till att värmeöverföring i spalten måste hanteras pessimistiskt då den maximala temperaturen på kapselytan beräknas.

Skillnaderna i hydraulisk konduktivitet hos bergmassan i Aberg, Beberg och Ceberg påverkar vattenmättnadstiden. Det är troligt att skillnader mellan de hydrauliska egenskaperna för olika deponeringshål på samma plats är större än skillnaden mellan platserna, detta eftersom alla platser förväntas ha några deponeringshål i mycket tätt berg utan vattenförande sprickor.



Figur 3-5. Vattenmättnadsgrad i bufferten vid olika tidpunkter.

Efter vattenmättnad är vattenledningsförmågan hos bufferten mycket låg vilket bidrar till dess isolerande funktion i förvaret.

Tilltro

Processförståelse: Förståelsen av de processer som driver vattentransport i omättade buffert- och återfyllningsmaterial och kunskapen om hur processerna påverkas av olika faktorer är tillräckligt god för att genomföra tillförlitliga modellberäkningar i säkerhetsanalysen, se Processrapporten.

Modeller och data: Beräkningarna kräver hydrauliska och mekaniska data om buffert/återfyllning samt data om de hydrauliska förhållandena i berget kring deponeringshål, vilket utgör den dominerande osäkerheten i beskrivningen av utvecklingen.

Kvalitet i indata och modeller som används i beräkningarna bedöms som tillräcklig för att genomföra en fullgod analys av den hydrauliska utvecklingen i basscenariot. Precisionen i beräkningarna skulle öka med bättre kunskap om de hydrauliska egenskaperna kring enskilda deponeringshål, något som kan förväntas först vid själva förvarsutbyggnaden. Långsiktiga hydromekaniska konsekvenser av kemiska förändringar i buffert- och återfyllningsmaterialen diskuteras i avsnitt 3.2.7.

Slutsatser

Full vattenmättnad i bufferten nås för en rad olika hydrauliska förhållanden i närberget inom något tiotal år. Då full vattenmättnad uppnåtts har bufferten de hydrauliska och mekaniska egenskaper som är avgörande för dess långsiktiga funktion i förvaret. Den hydrauliska konduktiviteten ligger under 10^{-12} m/s, vilket innebär att diffusion är den dominerande transportprocessen mellan kapsel och berg. Svälltrycket har byggts upp till cirka 8 MPa, vilket gör att bufferten kan "självläka" eventuella skador.

Tilltron till förståelse, modeller och data bedöms som tillräcklig för basscenariot.

3.2.6 Mekanisk utveckling

Den mekaniska utvecklingen i basscenariot omfattar mekaniska förändringar i geosfären (spänningsförändringar, bergrörelser och eventuell sprickbildning), på både kort och lång sikt och i olika skalor. I bufferten omfattar den mekaniska utvecklingen framför allt svällningen och de rörelser i buffert/återfyllning som svällningen orsakar. Till den mekaniska utvecklingen hör också en analys av hur kapseln påverkas av de belastningar den utsätts för av buffert och berg.

I basscenariot behövs:

- en analys av den långsiktiga mekaniska utvecklingen hos förvarsberget,
- en analys av svälltryckets utveckling i buffert/återfyllning,
- en analys av hur kapseln påverkas av de belastningar den utsätts för av buffert och berg.

Betydelse för säkerheten: Den mekaniska utvecklingen kan ha direkt betydelse för säkerheten genom att de mekaniska påfrestningarna på kapseln skulle kunna påverka dess isolerande förmåga.

Geosfären

I SR 97 har inga plats specifika bergmekaniska modellstudier genomförts. Analysen bygger i stället på tidigare studier och pessimistiska resonemang och överslagsberäkningar. Effekter av jordskalv behandlas inte i basscenariot.

Ett av de viktigaste syftena med de bergmekaniska analyserna är att uppskatta bergrörelser vid deponeringshål. Bergrörelser sker framför allt längs befintliga sprickor. En viktig förutsättning för analyserna av rörelser kring deponeringshål är därför att deponeringshålens positioner väljs så att de inte skärs av stora sprickor eller sprickzoner. Utgående från de naturliga bergspänningarna vid de tre platserna samt från de förändringar byggnationen av förvaret orsakar visas följande:

- Svälltrycket från buffert och återfyllning påverkar spänningsnivåerna marginellt. Däremot ger närvaron av buffert/återfyllning i förvarets hålrum ett viktigt bidrag till stabiliteten i berget kring deponeringshål och tunnlar.
- Termiska spänningar som uppstår då förvaret värms av resteffekten i bränslet ger enligt tidigare modellberäkningar millimeterstora sprickrörelser i närfältet. De termiska spänningarna blir som störst 50–200 år efter deponeringen. I större sprickzoner kan rörelsen bli någon centimeter.
- På lång sikt påverkas den mekaniska belastningen på förvarsberget av dels långsamma, storskaliga rörelser i berggrunden, dels av bergets egna långsiktiga materialegenskaper som kan ge tidsfördröjda deformationer (kryprörelser). Storskaliga rörelser kan grovt uppskattas ge genomsnittliga spänningsförändringar av 5 MPa på 100 000 år, vilket är litet i jämförelse med de osäkerheter som finns i bl a bestämningen av dagens naturliga bergspänningar. Effekterna bedöms bli betydligt mindre än de av den termiska pulsen. Långsiktiga kryprörelser i berggrunden skulle framför allt kunna leda till att deponeringshål och tunnlar komprimeras. Inte ens hypotetiska gränssfall av dessa effekter blir tillräckliga för att äventyra förvarets mekaniska stabilitet.

Processförståelse: Den grundläggande förståelsen för de processer och omgivningsförhållanden som styr förvarets mekaniska utveckling är inte fullständig. Särskilt gäller detta tidsberoende deformationer. Förståelsen är dock fullt tillräcklig för att med bl a pessimistiska överslag bedöma den mekaniska utvecklingen och stabiliteten i basscenariot.

Modeller: För några processer finns väl fungerande numeriska modeller som beskriver det mekaniska uppförandet hos berg och bergmassor. Modellerna kan tillämpas både i närfältsskalan och i förvarsskalan för de lastfall som förekommer i basscenariot. För tidsberoende deformationer och för nybildning av sprickor finns ännu inga fullt tillämpbara och validerade modeller. För bergmekaniska modeller gäller generellt att de används för att bygga upp processförståelsen och för att gränssätta de rörelser och deformationer som kan ha betydelse för förvarets säkerhet, snarare än för att göra noggranna prediktioner.

Data: Noggranna värden finns för de flesta bergmekaniska egenskaper i laboratorieskalan, men vid uppskalning till stora bergvolymerna kan osäkerheterna bli betydande. Även bergspänningsdata från fält kan ha betydande osäkerheter. För den principiella och gränssättande typ av analys som ligger till grund för slutsatserna i basscenariot är datakvaliteten dock fullt tillräcklig.

Buffert/återfyllning

Svällningen i bufferten analyserades i samband med buffertens hydrauliska utveckling ovan. Vid full vattenmättnad uppgår svälltrycket till cirka 8 MPa.

Kapsel

Kapseln utsätts för mekaniska laster via bufferten i form av grundvattentryck och svälltryck. Om trycket mot kapselytan är jämnt fördelat tål en BWR-kapsel en belastning av 80 MPa och en PWR-kapsel 110 MPa. Detta är långt över summan av svälltryck (8 MPa) och grundvattentryck på 500 meters djup (5 MPa).

Svällningen kan också ge upphov till ett ojämnt fördelat tryck. Kapselns hållfasthet har analyserats för ett antal tänkta sådana fall under och efter buffertens vattenmättnadsfas. Fallen är pessimistiska förenklingar av inte helt orimliga situationer. Inget av beräkningsfallen för svällningen i bufferten som redovisades ovan ger dock så höga påfrestningar som fallen kapseln analyserats för. Påfrestningarna uppskattades överslagsmässigt eller med modellberäkningar. Inget av belastningsfallen bedömdes kunna ge skador på kapseln.

För att kunna bedöma konsekvenserna av berg rörelser kring deponeringshål har också kapselns hållfasthet beräknats för en postulerad förskjutning på 0,1 m under 30 dagar längs en horisontell spricka. Resultaten visade att berg rörelser i storleksordningen 0,1 m inte leder till omedelbara kapselbrott. Med pessimistiska uppskattningar kan det dock inte uteslutas att krypdeformation i kopparhöljet efter en sådan berg rörelse kan leda till brott på kopparhöljet i tidsperspektivet tiotusentals år. Detta behöver utredas ytterligare.

Tilltro

Processförståelse: Den grundläggande förståelsen för hållfasthet och deformationer i kapselmaterialet är god.

Modeller och data: Tilltron till modeller och data bedöms som tillräcklig för de beräkningar som redovisas i basscenariot. Analyserna kan behöva utvidgas till att innefatta även inhomogena materialegenskaper som t ex kan uppkomma till följd av gjutfel i järninsatsen. Även beräkningarna av kryprörelser behöver revideras i takt med att materialdata för det faktiska kapselmaterialet blir tillgängliga.

Slutsatser

Bergets långsiktiga stabilitet bedöms i basscenariot vara sådan att inga berg rörelser som kan leda till kapselbrott kommer att äga rum under de närmaste 100 000 åren. Överslagsberäkningar visar att väsentligt större skjuvspänningar och spänningsnivåer än de som i allmänhet råder i den svenska berggrunden skulle fordras för att kryprörelser eller lastförändringar orsakade av storskaliga tektoniska rörelser, var för sig eller tillsammans, ska kunna leda till kapselbrott. Det finns inget som motsäger att ett miljonårsperspektiv skulle resultera i samma bedömning.

Bedömningen gäller för de tre förvarsplatserna Aberg, Beberg och Ceberg, där förhållandena inte avviker signifikant från förhållandena i berggrunden i övrigt.

Inte heller de grundvatten- eller svälltryck (jämnt eller ojämnt fördelade) som kan förekomma i basscenariot ger belastningar som kan hota kapselns integritet i ett hundratusenårigt perspektiv.

Basscenariot och därmed dessa slutsatser omfattar inte jordskalv, se vidare avsnitt 3.5.

3.2.7 Kemisk utveckling

Den kemiska utvecklingen omfattar en integrerad behandling av alla de kemiska reaktions- och transportprocesser som identifierats i systembeskrivningen. Här finns kopplingar till framför allt den hydrauliska utvecklingen i buffert och geosfär.

Kapselns inre är kemiskt isolerad från omgivningen så länge kopparkapseln förblir intakt och tonvikten ligger därför på utvecklingen i geosfär och buffert/återfyllning, liksom på utvändigt korrosion av kopparkapseln. En lång rad processer visas i Processrapporten inte vara betydelsefulla för utvecklingen i basscenariot och behandlas därför inte.

I basscenariot behövs beskrivningar av:

- Utvecklingen av grundvattnets sammansättning på sikt. Här är ett viktigt krav att vattnet på förvarsdjup är syrefritt.
- Buffertens kemiska utveckling givet grundvattnets utveckling.
- Kapselkorrosion.

Betydelse för säkerheten: Den kemiska utvecklingen kan ha direkt betydelse för säkerheten genom att korrosion av kapseln skulle kunna påverka dess isolerande förmåga. Dessutom kan buffertens funktion påverkas av kemiska förändringar. På lång sikt avgör grundvattnets kemiska egenskaper tillsammans med buffertens och kopparkapselns egenskaper hur länge buffert och kapsel fungerar.

Utveckling av grundvattnets sammansättning på sikt

Baserat på plats specifika mätningar bestäms en representativ sammansättning för de grundvatten som idag finns på förvarsdjup för varje plats. Vattnet vid Aberg är salt, vid Ceberg sött och vid Beberg förekommer båda vattentyperna. Vid samtliga platser är vattnet syrefritt. Halter av en rad andra ämnen av betydelse för kapselkorrosion, buffertstabilitet, radionuklidtransport etc anges platsspecifikt.

Byggandet av förvaret kommer att störa vattensammansättningen genom att flödesförhållandena förändras då förvarsberget delvis dräneras och genom att framför allt syre, konstruktions- och strömmaterial tillförs vid byggnationen.

De ursprungliga flödesförhållandena återinträder i takt med att förvaret återmättats efter förslutning. Tillfört organiskt material förväntas reagera med tillfört syre, trevärt järn i grundvattnet och eventuellt sulfat i grundvattnet. Tillfört oorganiskt material, framför allt betong och stål, bedöms påverka grundvattensammansättningen marginellt. Efter omkring 100 år bedöms grundvattnets sammansättning ha återgått till den ursprungliga vid de tre platserna.

Grundat på mätningen av den ostörda grundvattensammansättningen, kunskapen om hydrokemiska processer och erfarenheter från modellstudier av långsiktig hydrokemisk utveckling, både historiskt och framåt i tiden görs expertbedömningar av grundvattnets sammansättning vid förslutning och under olika tidsepoker i framtiden. Halterna av viktiga komponenter anges som intervall, platsspecifikt för varje epok.

Grundvattnet på förvarsdjup förväntas kort efter förslutning och under alla senare epoker vara syrefritt. Syre i nedträngande ytvatten förbrukas i regel redan i markskiktet genom biologiska processer. Dessutom finns en mycket stor potential för syreförbrukning i bergets mineral.

Om cirka 2000 år förväntas landhöjningen leda till att ön Aberg övergår till att bli en kustnära del av fastlandet. De huvudsakliga effekterna för grundvattnet blir ett något ökat flöde och en successiv minskning av salthalten på allt större djup. I ett tiotusenårigt perspektiv förväntas grundvattensammansättningen vid Aberg närma sig den hos dagens söta vatten vid Ceberg.

Beberg befinner sig idag i en övergång från salt till sött vatten till följd av kvardröjande effekter av den historiska klimatutvecklingen, bl a landhöjningen. I ett tiotusenårigt perspektiv förväntas sammansättningen för även Bebergs grundvatten närma sig den för det söta Cebergvattnet.

Vid Ceberg förväntas inte den långsiktiga utvecklingen förändra grundvattensammansättningen nämnvärt med förutsättningen i basscenariot att dagens klimat består.

Tilltro

Processförståelse: Förståelsen av de grundläggande reaktionerna liksom mekanismerna för hur lösta ämnen transporteras med grundvattnet är god, se Processrapporten.

Modeller: Modeller som på olika sätt behandlar grundvattnets sammansättning och utveckling används inte direkt för prediktioner i säkerhetsanalysen. Modelluppsättningen utvecklas ständigt och utgör ett stöd i uppbyggnaden av förståelsen av den grundvattenkemiska utvecklingen vid en förvarsplats.

Data: Dataosäkerheterna är generellt stora. Dels kan dagens situation bara observeras i enstaka punkter (borrhål) i den heterogena geosfären, dels styrs den framtida utvecklingen av förhållandena utanför förvarsområdet och av kvardröjande effekter av den historiska klimatutvecklingen för vilka båda råder stora osäkerheter. Osäkerheterna gör att den framtida grundvattensammansättningen på en förvarsplats måste anges som ett intervall enligt redovisningen i huvudrapporten. Tilltron till att sådana intervall kan bestämmas genom att systematiskt ta hänsyn till faktorer och osäkerheter som påverkar utvecklingen är god.

Kemisk utveckling i buffert/återfyllning

Tillsammans med påverkan från det omgivande grundvattnet bidrar flera processer till den kemiska utvecklingen i buffert/återfyllning, framför allt:

- jonbyte där montmorillonitens ursprungliga innehåll av sorberade natriumjoner byts mot joner i det omgivande grundvattnet, i första hand kalcium
- upplösning av föroreningar i bufferten vilket tillsammans med påverkan av det platsspecifika grundvattnet, leder till förändringar av pH och redoxförhållandena
- kemisk omvandling av montmorillonit till icke svällande mineral, särskilt genom illitisering

Processerna påverkar joninnehållet i montmorilloniten, halten fasta föroreningar, porvattensammansättning och densitet i bufferten. Detta påverkar i sin tur buffertens funktion.

Dessutom skulle eventuell erosion av bufferten genom att grundvattnet bortför lera, långsiktigt kunna minska buffertens densitet.

Jonbyte och upplösning av föroreningar modelleras integrerat där platspecifika grundvattensammansättningar och de två viktigaste föroreningsmineralen, pyrit och kalcit, inkluderas. För samtliga platser beräknas som funktion av tid fördelningen natrium/kalciummontmorillonit, kalcithalter, pH-värden och redoxförhållanden i bufferten.

Jonbytet går snabbast vid Aberg där grundvattnet är kalciumrikt och där flödet är relativt högt. I tidsperspektivet 100 000 år förväntas ett nära fullständigt jonbyte vilket i sin tur leder till en sänkning av svälltrycket, från 7–8 MPa till 4–5 MPa. Vid Beberg är processen ungefär 10 gånger långsammare och vid Ceberg blir omvandlingen aldrig fullständig eftersom förhållandet natrium/kalcium i grundvattnet är för högt. En sänkning av svälltrycket till 4–5 MPa har ingen betydelse för buffertens funktion.

Påverkan av de omgivande grundvattnet och upplösningen av kalcit ger förändringar i pH och redoxförhållanden. De mest påtagliga förändringarna förutses vid Ceberg där pH beräknas stiga till 10,7 för att sedan sjunka till drygt 8. Förändringarna påverkar inte buffertens normala funktion.

Pyritupplösning förutsätter att grundvattnet innehåller syre och förväntas därför inte ske annat än under den korta inledande period då syre som tillförts under byggnation och drift förbrukas.

Natriummontmorillonit kan omvandlas till icke svällande mineral framför allt genom **illitisering** vilket kräver tillgång till kalium. Genom att anta att endast kaliumtillgången begränsar processens omfattning kan en övre gräns för omvandlingshastigheten beräknas. Vid Aberg där kaliumtillförseln är högst, beräknas 2,5 procent av bufferten ha omvandlats efter en miljon år med denna pessimistiska uppskattning. Illitisering bedöms därför ha en försumbar inverkan på buffertens funktion.

Dagens kunskap visar att **erosion** av bufferten förhindras om grundvattnet innehåller tillräckliga halter av positiva joner, t ex kalciumjoner. Utvecklingen av grundvattensammansättningen ovan visar att så är fallet för samtliga platser, både idag och i framtiden. Omfattningen av erosion på lång sikt med extremt jonfattiga grundvatten kan behöva utredas ytterligare.

I sammanfattning bedöms bufferten behålla ett tillräckligt högt svälltryck, en tillräckligt hög densitet och en tillräckligt låg vattenledningsförmåga vid samtliga platser i ett mycket långt tidsperspektiv.

Återfyllningen har inte analyserats i samma detalj som bufferten. Dessutom har inte några anpassningar av återfyllningsmaterialet till de platspecifika grundvattensammansättningarna gjorts i SR 97. Behandlingen av återfyllningsmaterialets långsiktiga funktion behöver utvecklas inför kommande säkerhetsanalyser.

Tilltro

Processförståelse: Den grundläggande förståelsen för samtliga processer i buffertens kemiska utveckling är tillräcklig för att möjliggöra en hantering i säkerhetsanalysen. De långsiktiga effekterna av erosion under extrema förhållanden kan eventuellt behöva utredas ytterligare.

Modeller och data: Tilltron till de modeller och data som används för beräkningar av buffertens kemiska utveckling bedöms som tillräcklig för de relativt grova modellberäkningar som krävs i basscenariot.

Kapselkorrosion

Koppar är mycket stabil i den miljö ett djupförvar erbjuder. Den enda kända koppar-korrodanten som identifierats i djupa svenska grundvatten är sulfid. Initialt finns också syre i bufferten och tunnelåterfyllningen liksom sulfat som kan omvandlas till sulfid. Tidigt efter deponeringen kan även små mängder salpetersyra tänkas bildas genom radiolys av buffertens porvatten.

Pessimistiska överslagsberäkningar visar att ingen av dessa faktorer hotar kapselns isolering ens i ett miljonårsperspektiv. Ingen mekanism som skulle kunna leda till en lokal korrosionsattack har heller identifierats.

Tilltro

Processförståelse: Den grundläggande förståelsen av olika mekanismer för koppar-korrosion i djupförvarsmiljö är god, se Processrapporten.

Modeller och data: I säkerhetsanalysen görs kvantitativa uppskattningar av koppar-korrosion med överslagsberäkningar, vilket ger en tillräcklig noggrannhet. Data-osäkerheter rör framför allt tillgången på korrodanter. Osäkerheterna hanteras i säkerhetsanalysen pessimistiskt.

Slutsatser

I basscenariot har inga långsiktiga förändringar identifierats som motsäger slutsatsen att grundvattnet på förvarsdjup kommer att förbli syrefritt i ett miljonårsperspektiv.

Grundvattnets långsiktiga sammansättning i allmänhet och särskilt dess innehåll av ämnen som kan skada kapsel eller buffert kan uppskattas platsspecifikt i form av intervall. Intervallens storlek bestäms av osäkerheter i dagens platsspecifika grundvattensammansättning, i den långsiktiga utvecklingen av flödessituationen och i de hydrokemiska förhållanden i berggrunden.

Intervallen kan användas för att bl a studera kemisk utveckling i buffert och kapsel t ex genom att pessimistiskt anta att det mest ogynnsamma värdet i intervallet blir rådande. Sådana analyser visar att bufferten förväntas behålla ett tillräckligt högt svälltryck, en tillräckligt hög densitet och en tillräckligt låg vattenledningsförmåga vid samtliga platser i ett mycket långt tidsperspektiv. Kapseln beräknas med god marginal klara de korrosionsangrepp den utsätts för i ett miljonårsperspektiv.

Behandlingen av återfyllningsmaterialets långsiktiga funktion behöver utvecklas inför kommande säkerhetsanalyser. Även omfattningen av erosion vid extremt jonfattiga grundvattenförhållanden kan behöva studeras ytterligare.

3.2.8 Sammanfattning: Basscenariot i ett tidsperspektiv

Som en sammanfattning av resultatet av analysen av basscenariot summeras här hela utvecklingen uppdelad i tre tidsepoker.

De inledande 100 åren

Bränslets farlighet minskar under denna epok till ungefär 60 procent av farligheten vid deponering.

Omedelbart efter deponering startar en uppvärmning av hela förvaret, driven av rest-effekten i bränslet. Den maximala temperaturen på kapselns utsida, högst 90 °C, nås efter cirka 10 år. På randen till deponeringshålen nås temperaturmaximum efter cirka 20 år. I en större skala nås temperaturmaximum på förvarsdjup efter 90 år i Beberg (45 °C) och efter 80 år i Ceberg (40 °C).

Bufferten, som initialt har en vattenmättnadsgrad av cirka 80 procent, tar samtidigt med uppvärmningen upp vatten från det omgivande berget. Tiden till full vattenmättnad är något tiotal år och varierar med de hydrauliska förhållandena i berget kring deponeringshålet. Samtidigt återställs successivt grundvattennivån ovanför förvaret.

I slutskedet av buffertens vattenmättnadsförlopp utvecklas ett svälltryck mot kapseln. Svälltrycket och grundvattentrycket ger ett totalt tryck av omkring 12 MPa mot kapseln vilket är långt under den mekaniska belastning kapseln klarar. Svälltrycket kan framför allt under vattenmättnadsskedet vara ojämnt fördelat över kapselns yta. De mekaniska spänningar detta leder till i kapseln ligger också långt under de påfrestningar kapseln är dimensionerad att tåla. Värmeutvidgningen av förvarsberget kan ge millimeterstora sprickrörelser kring deponeringshålen.

Den grundvattenkemiska utvecklingen karakteriseras under de inledande 100 åren av att den naturliga situationen störts av att vatten i regionen kring förvaret ”dragits in” mot förvaret som en konsekvens av att grundvattnet ständigt pumpats bort under byggnationen. Djupare liggande salt vatten kan på detta sätt dras upp till förvarets närhet. De kemiska förhållandena är också störda av att bl a syre och konstruktionsmaterial tillförts då förvaret byggs. Tillfört både organiskt och oorganiskt material förväntas förbrukas så att grundvattensammansättningen blir snarlik den ursprungliga inom 100 år.

Hundra år till 10 000 år

Bränslets farlighet minskar under denna epok från 60 procent till cirka 0,6 procent av farligheten vid deponering. Uppvärmningen av geosfären fortsätter och en värmevåg beräknas nå ytan, men påverkan blir försumbar. Vid tvåplansförvaret i Aberg nås temperaturmaximum mellan förvarsplanen (55 °C) efter cirka 450 år.

Hydrauliskt sker endast små förändringar under denna epok. Bufferten är mättad med vatten och grundvattnets strömning i geosfären liknar den naturliga situation som rådde innan förvaret byggdes. Med tiden kommer landhöjningen att påverka flödet, framför allt vid ön Aberg som förväntas övergå till att bli en del av fastlandet om ungefär 2 000 år, men effekterna på flödet är små.

Den mekaniska situationen för buffert och kapsel förväntas vara stationär eftersom bufferten förblir vattenmättad. I geosfären leder uppvärmningen till en uppbyggnad av spänningar som delvis relaxeras genom termisk expansion. Vissa sprickor sluts och andra öppnas men påverkan är sannolikt inte tillräcklig kraftig för att leda till sprickbildning. I större sprickzoner kan centimeterstora termiskt orsakade rörelser förekomma.

På lång sikt leder förändringar av flödesförhållandena till att det salta vattnet vid Aberg och blandningen av sött och salt vatten vid Beberg övergår till en sammansättning som alltmer liknar dagens söta vatten vid Ceberg.

I bufferten pågår ett utbyte av buffertens ursprungliga innehåll av natriumjoner mot kalciumjoner i grundvattnet. Kalcit i bufferten löses långsamt upp.

Bufferten har en så låg vattenledningsförmåga att transport av vattenlösta ämnen, bl a kapselkorrodanter helt sker genom diffusion. Korrosionsprocesser i kopparkhöljet har under denna epok försumbara konsekvenser.

Tiden efter 10 000 år

I realiteten är det sannolikt med större klimatförändringar under denna epok. I bas-scenariot studeras utvecklingen vid dagens klimatförhållanden för att användas som jämförelsegrund för effekterna av klimatförändringar som är osäkra till både art och omfattning.

På 100 000 år avtar bränslets farlighet till cirka 0,05 procent av den initiala och ligger därefter i nivå med farligheten hos den uranmalm som brutits för att framställa bränslet. Fortfarande finns i bränslet både små mängder radionuklider som relativt lätt kan röra sig genom förvarets barriärer om kapseln skulle skadas, och större mängder svårörliga nuklider. Resteffekten har efter 10 000 år avtagit till mindre än en procent av den ursprungliga och temperaturförhållandena i förvarssystemet närmar sig åter den naturliga situationen.

Eftersom dagens klimat består enligt definitionen av scenariot förblir den hydrauliska situationen i geosfären oförändrad. Även grundvattensammansättningen kring förvaret förblir oförändrad.

Under denna epok påverkas den mekaniska belastningen på förvarsberget av dels långsamma, storskaliga rörelser i berggrunden, dels av bergets egna långsiktiga material-egenskaper som kan ge tidsfördröjda deformationer (krypörelser). Överslagsberäkningar visar att effekterna av båda dessa processer är försumbara.

Effekterna av kopparkorrosion är mycket små även i ett miljonårsperspektiv.

Buffertens kemiska utveckling karakteriseras av ett fortsatt jonbyte och upplösning av kalcit. I Aberg förväntas ett fullständigt utbyte från natrium till kalcium efter några hundra tusen år. Effekten blir en sänkning av svälltrycket till 4–5 MPa. Vid Beberg går processen ungefär 10 gånger långsammare och vid Ceberg blir omvandlingen aldrig fullständig eftersom förhållandet natrium/kalcium i grundvattnet är för högt. Minskningen i svälltryck har ingen betydelse för buffertens funktion. Inte heller kalcitupplösningen eller påverkan av det omgivande grundvattnet ger några förändringar som påverkar buffertens normala funktion.

3.2.9 Övergripande slutsatser

Under förvarssystemets utveckling i basscenariot behåller kapseln sin isolerande förmåga.

De mekaniska påfrestningarna på kapseln från grundvattentryck, buffertens svälltryck och från bergörelser kring deponeringshålen är alla långt mindre än vad som krävs för att äventyra isoleringen. Den mekaniska utvecklingen i förvarsberget har diskuterats i ett hundra tusenårigt perspektiv och det finns inget som motsäger att ett miljonårsperspektiv skulle resultera i samma bedömning.

Inte heller de kemiska påfrestningarna på kapseln i form av korrosion av syre eller sulfid ger ens i ett miljonårsperspektiv skador på kopparkhöljet som äventyrar isoleringen.

Bedömningen grundar sig bl a på kraven att kapselns yttemperatur ska ligga under 100 °C och att vattnet på förvarsdjup ska vara syrefritt. Det förra kan alltid uppnås med

en lämplig utplacering av deponeringshålen eller genom anpassning av bränsleinnehållet i kapslarna. I djupa svenska grundvatten har syre aldrig observerats. Syre i regnvatten förbrukas i regel effektivt redan i markskiktet. Dessutom finns mikrober i berget och mineral i både berg och buffert med mycket stor potential till syreförbrukning. I basscenariot har inga långsiktiga förändringar eller processer identifierats som motsäger slutsatsen att grundvattnet på försvarsdjup kommer att förbli syrefritt i ett miljonårsperspektiv.

Bedömningen av kapselns integritet grundar sig också på att bufferten ska fungera som avsett vilket bl a betyder att bufferten bör ha en tillräckligt låg hydraulisk konduktivitet, en tillräckligt hög densitet och ett tillräckligt svälltryck. Processer som t ex jonbyte, mineralomvandlingar eller erosion ger i basscenariot inga förändringar av buffertens egenskaper som skulle kunna äventyra funktionen ens i ett miljonårsperspektiv. Resultatet är förväntat i så motto att buffertmaterialet är taget från en naturlig miljö där förhållandena i årmiljoner liknat dem på försvarsdjup i svensk berggrund.

Förståelsen för återfyllningsmaterialets långsiktiga funktion och för bufferterrosion under extrema grundvattenkemiska förhållanden behöver utvecklas inför kommande analyser.

3.3 Kapseldefektsscenario

Förutsättningarna för kapseldefekts scenariot är desamma som för basscenariot så när som på en viktig punkt: Ett fåtal kapslar tänks vara defekta så att isoleringen redan vid förvarets förslutning är äventyrad. Orsaken till defekterna skulle kunna vara små, upptäckta tillverkningsfel.

I övrigt gäller som för basscenariot i korthet att förvaret tänks vara byggt enligt specifikationer och att dagens förhållanden i omgivningen tänks bestå. Utvecklingen i och kring den majoritet av kapslar som antas vara oskadade förväntas därmed vara densamma som för basscenariot och dessa behandlas därför inte i kapseldefekts scenariot.

I kapseldefekts scenariot utreds en rad förhållanden som ger indata till beräkningar av radionuklidtransport:

- Den hydromekaniska utvecklingen i en defekt kapsel, dvs hur vatten kan tränga in i en liten skada i kopparhöljet och leda till korrosion med omfattande gasbildning och så småningom till mekaniska påfrestningar som förstör den initiala skadan.
- Den kemiska utvecklingen i en defekt kapsel, framför allt korrosion av gjutjärnsinsatsen, bränsleupplösning och lösning av radionuklider.
- Den hydrauliska situationen i geosfären som måste beskrivas betydligt noggrannare än i basscenariot.
- Transportprocesser för radionuklider i kapsel, buffert och geosfär.
- Radionuklidspridning i biosfären.

Dessutom diskuteras sannolikheter och storlekar på eventuella skador i kapselns kopparhölje samt kriticitetsförhållanden i en defekt kapsel.

Data från områdena ovan används för beräkningar av radionuklidspridning i kapsel, buffert, återfyllning, geosfär och biosfär. En genomgående strävan är att för alla indata fastlägga både rimliga och pessimistiska värden och i de få fall där det är möjligt också

statistiska fördelningar. Datauppsättningen används till att formulera ett antal beräkningsfall som resulterar i uppskattningar av doser till individer i förvarets närhet. Även probabilistiska beräkningar genomförs för att få ett riskmått som direkt kan jämföras med acceptanskriteriet för ett djupförvar.

Alla processer och beroenden som förekommer i basscenariot, kapitel 8, förekommer även i kapseldefekts scenariot. För kapslar med genomgående skador tillkommer dessutom en rad processer, de flesta inuti den skadade kapseln. Dessutom tillkommer en detaljerad beskrivning av processer som påverkar transporten av radionuklider i buffert, återfyllning och berg.

3.3.1 Initiala kapselskador

En uppskattning av storlek och frekvens av initiala defekter måste bygga på antaganden och resonemang. Statistiskt relevanta data om defekter och frekvenser kan inte byggas upp innan det finns erfarenhet från ett stort antal kapslar som förslutits och sedan kontrollerats. Även ett sådant underlag skulle vara av begränsat värde eftersom de kapslar som upptäcks med defekter skulle kasseras eller åtgärdas och därför inte direkt kan användas för att uppskatta frekvens av defekta kapslar som undgår en kontroll.

Det grundläggande resonemanget för att bedöma storlek och omfattning av de initiala defekterna är dels att det bara finns få skeenden som skulle kunna leda till en initial defekt, dels att defekten inte bör kunna vara större än att det finns någon rimlighet i att den undgår upptäckt i en kvalitetskontroll. Om en skada ändå skulle förekomma är det därför troligast att den finns i svetsen mellan lock och mantel. De övriga svetsarna i kapselhöljet är lättare att inspektera eftersom detta kan göras både in- och utvändigt och dessutom i en icke radioaktiv miljö.

I kapseldefekts scenariot ansätts som ett rimligt fall att en kapsel av totalt cirka 4 000 har passerat kvalitetskontrollen trots en genomgående defekt av storleken 1 mm². I det pessimistiska fallet antas fem kapslar (dvs cirka 0,1 procent) ha sådana defekter.

3.3.2 Strålrelaterad utveckling, kriticitet

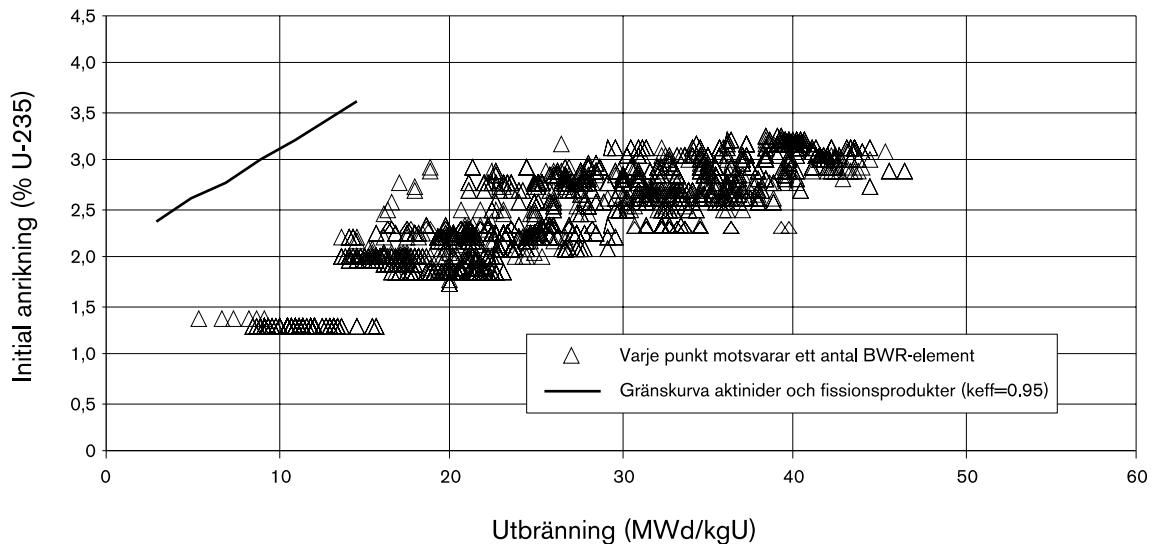
Den strålrelaterade utvecklingen antas i allt väsentligt vara densamma för en skadad och en oskadad kapsel, dvs strålnivåer i och kring kapseln påverkas mycket marginellt av en skada i kopparhöljet med åtföljande vatteninträngning.

En viktig fråga kring den strålrelaterade utvecklingen måste dock utredas i detalj: Kan förhållandena i en skadad kapsel under några omständigheter tänkas bli sådana att en fissionsprocess blir självunderhållande? Här är det viktigt att studera olika bränsletyper, utbränningsgrader och hydrauliska förhållanden inne i kapseln.

Förutsättningar

Kriticitetsförhållandena har beräknats med den kapselutformning som beskrivs i avsnitt 2.3, för BWR-bränsle av typ SVEA 64 med en medelanrikning av 3,6 procent U-235 och för PWR-bränsle av typ F17x17 med en medelanrikning av 4,2 procent U-235.

Dessa bränslen ger ur kriticitetssynpunkt en täckning av de bränsletyper som förväntas förekomma i ett verkligt förvar. Referensbränslet i SR 97 (BWR, SVEA 96) har en mindre benägenhet till kriticitet.



Figur 3-6. Gränskurva och bränsledata för BWR-bränsle.

Beräkningarna görs för en situation där bränslet tänks placerat i kapslar där insatsens hålrum fyllts med vatten och där kapslarna utvändigt är omgivna av bentonit.

I figur 3-6 visas en kurva med kombinationer av anrikning och utbränning som ger acceptabla kriticitetsegenskaper för BWR-bränsle. Fissionsprodukter som absorberar neutroner och därmed sänker reaktiviteten är inkluderade i beräkningen.

I figuren är också egenskaperna för allt BWR-bränsle i CLAB den 31 december 1998 inlagda. Alla bränsleelement ligger under gränskurvan i diagrammet och kan därmed ur kriticitetssynpunkt accepteras för placering i kapseln. Resultatet för PWR-bränsle är snarlikt.

Inför beräkningarna analyserades osäkerheter i bestämningen av utbränningsgraden. Också effekter av ojämn utbränning inom bränsleelementet, av urplockade bränslestavar, varierande avstånd mellan kanaler, spaltbredd mellan element och kanal, excentrisk placering samt håligheter och porositeter i insatsen analyserades. Beräkningarna är gjorda med marginal för osäkerheter i samtliga dessa faktorer.

Långsiktiga förändringar i bränsle (förändringar av inventariet till följd av radioaktivt sönderfall) och kapseln (förändrad miljö till följd av korrosion) motverkar uppkomsten av kriticitet.

Slutsatser

Analyserna visar att det använda BWR- och PWR-bränsle som finns i CLAB och det som kommer från de svenska kärnkraftverken kan förvaras i kapslarna med god marginal till kriticitet även om kapslarna av någon anledning helt eller delvis skulle fyllas med vatten. Framtida förändringar av isotopsammansättning, material eller geometri förutses ge bibehållen marginal till kriticitet.

3.3.3 Hydromekanisk utveckling i defekt kapsel

Den hydrauliska utvecklingen i en kapsel med skadat kopparhölje ligger till grund för alla väsentliga processer som skiljer utvecklingen hos en skadad kapsel från den hos en oskadad: Inträngning av vatten är en förutsättning för korrosion av gjutjärnsinsatsen som i sin tur ger produktion av vätgas. Vatten är också en förutsättning för korrosion av bränslets metalldelar, bränsleupplösning och radionuklidtransport.

Genom att korrosionsprocesserna dels förbrukar vatten, dels producerar vätgas finns starka kopplingar mellan den kemiska och den hydrauliska utvecklingen och dessa måste därför delvis beskrivas i ett sammanhang. Även vissa aspekter av den mekaniska utvecklingen måste behandlas parallellt med de hydrokemiska processerna.

Processerna är betydelsefulla för funktionen hos ett förvar. För att radionuklider ska kunna transporteras ut från det använda bränslet krävs en kontinuerlig vattenväg mellan bränslet och grundvattnet i berget, med undantag av nuklider som transporteras med gas. Förbrukningen av vatten genom korrosion i kapseln gör att det kan ta mycket lång tid innan en sådan vattenväg bildas.

Till grund för beskrivningen ligger två nya modellstudier av den hydromekaniska utvecklingen i en kapsel med skadat kopparhölje.

Hydraulisk utveckling i kapseln

Vid en genomgående skada i kapselns kopparhölje kan vatten drivas genom bufferten och in i kapseln av skillnaden mellan kapselns inre gastryck och grundvattentrycket. Då vatten kommer i kontakt med järninsatsen kommer denna att korrodera. Järnkorrosionen förbrukar inträngande vatten samtidigt som vätgas bildas och gastrycket i kapseln ökar. Därmed reduceras tryckdifferensen över bufferten och inflödet av vatten minskar.

Modellstudierna tyder på att inträngande vatten i en kapsel kommer att förbrukas och torra förhållanden kommer att råda under långa tider. Processens förlopp är dock starkt beroende av värdet på framför allt korrosionshastigheten och storlek och form på skadan i höljet.

Vatteninträngning via diffusion

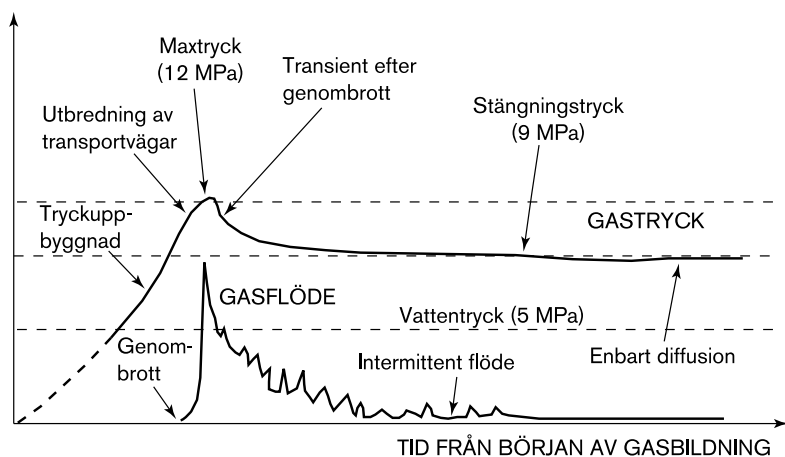
Då gastrycket i insatsen når grundvattentrycket kommer inflödet av vatten till kapseln att avstanna. Vatten kan därefter fortsätta att tränga in genom diffusion och på så sätt upprätthålla korrosionen. Diffusionen är mycket långsam; med en 1 mm² cirkulärt hål och korrosionshastigheten 0,1 µm/år blir inflödet cirka 10⁻⁵ l/år.

Mekaniska effekter av korrosionsprodukter

Då insatsen korroderar kommer ett lager av magnetit att byggas upp bl a mellan insats och hölje. Magnetit har lägre densitet än järn och korrosionsprodukterna kommer därför att utöva ett tryck mellan insats och hölje. Om korrosionen sker lokalt kring skadan i kopparhöljet, visar beräkningar att höljet deformeras kraftigt kring defekten utan att själva defekten vidgas.

Höljet beräknas brista då det töjts cirka 20 mm. Densitetsförhållandet mellan magnetit och järn är 1:2,1 och med en korrosionshastighet av 0,1 µm/år kan brottiden beräknas till cirka 200 000 år.

Om korrosionen sker över hela insatsens ytteryta töjs hela kopparhöljet av trycket från korrosionsprodukterna. I ett långt tidsperspektiv med global korrosion medför uppbygg-



Figur 3-7. Tidsförloppet vid gastransport genom bentonit. Tidsskalan i figuren är relativ och beror på bl a hastigheten för tryckuppbyggnaden.

naden av korrosionsprodukter att kopparhöljet töjs och då uppkommer de största töjningarna kring kapsellocket. Efter cirka 200 000 år beräknas höljet brista vid locket.

För att bestämma hur den globala korrosionen påverkar buffert och berg har de mekaniska spänningarna i kapsel, buffert och 10 cm av berget beräknats. Då insatsen korroderat fullständigt beräknas kopparhöljets radie ha töjts 55 mm. Buffertens egenskaper gör att den kan ta upp merparten av spänningarna från kapseln utan att föra över dem till berget i denna situation.

De maximala tryckspänningarna i berget beräknas till omkring 4 MPa och dragspänningarna till 1,4 MPa. Tryckspänningarna bedöms inte påverka berget. Dragspänningarna skulle kunna orsaka lokala sprickor i nedre kanten av deponeringshålet.

Gastransport genom buffert

Bufferten är i vattenmättat tillstånd ogenomtränglig för strömmande gas och därför förväntas ett gastryck byggas upp i kapselns hålrum. Gasen kan lösas i vatten och diffundera genom bufferten ut till berget men transportkapaciteten är inte tillräcklig för att transportera bort bildad gas vid vare sig global eller lokal korrosion.

Flera experiment har visat att bentonit inte släpper igenom gas förrän trycket i kapseln överstiger summan av svälltrycket och grundvattentrycket, dvs cirka 12–14 MPa. Då trycket når detta värde bildas en transportväg genom bufferten och gas frigörs. Trycket kommer att sjunka och gasproduktionen bestämmer den fortsatta utvecklingen:

- Om trycket sjunker till ett tillräckligt lågt värde stängs transportvägen. Detta så kallade stängningstryck är beroende av svälltrycket. Vid normalt svälltryck, 7–8 MPa är stängningstrycket 3–5 MPa enligt mycket preliminära uppskattningar. Därefter transporteras gas åter enbart med diffusion, se figur 3-7. Om gasproduktionen pågår tillräckligt länge kan man i detta fall få ett cykliskt förlopp med successiva gaspulsutsläpp och tryckuppbyggnader.
- Om gasproduktionen däremot är tillräcklig för att upprätthålla ett högre tryck förväntas gastransportvägen förbli öppen.

Buffertens kapacitet för gastransport är föremål för undersökningar.

Sekvens av händelser

Baserat på modellstudierna av olika hydromekaniska delförlopp kan en rimlig händelseutveckling med en 1 mm² kapselskada och en korrosionshastighet av 1 µm/år tecknas:

Tiden fram till cirka 11 000 år: Vatten förväntas strömma in i kapseln drivet av tryckskillnaden mellan grundvattnet i berget och gasen i kapselns hålrum. Korrosionshastigheten är tillräckligt hög för att förbruka allt vatten. Efter cirka 11 000 år beräknas trycket i kapseln nå 5 MPa och intransporten av vatten sker därefter genom diffusion av vattenånga.

11 000 till 18 000 år: Vatten diffunderar in kring skadan och korrosion förväntas endast lokalt cirka 5 cm kring defekten. Efter cirka 18 000 år beräknas korrosionsprodukterna ha fyllt den 2 mm vida spalten mellan insats och hölje och höljet kommer att börja töjas. Gasproduktionen är låg i det här tidsintervallet, eftersom intransporten av vatten är långsam.

18 000 till 200 000 år: Korrosionsprodukterna kring defekten förväntas töja ut kopparhöljet. Efter cirka 200 000 år beräknas kopparhöljet ge vika och ett hål lika stort som korrosionsytan uppkommer. I det här tidsintervallet är gasproduktionen fortfarande låg.

200 000 till 400 000 år: När ett större hål har bildats kommer vattentransporten in till kapseln åter att öka och det är troligt att hela insatsens yta kommer att korrodera. I det här skedet är det inte omöjligt att gasproduktionen antar det maximala värdet $1,5 \cdot 10^{-2}$ m³/år (STP). Tryckökningen blir då maximalt cirka 1 MPa på 700 år vilket gör att gasen sannolikt inte kan försvinna med diffusion och gasutsläpp kan förväntas i bufferten. Töjningarna blir nu störst kring kapsellocket och efter cirka 400 000 år beräknas höljet brista vid locket.

400 000 till 700 000 år: Den globala korrosionen fortsätter och efter cirka 700 000 år har insatsen korroderat igenom till bränslekanalerna. Töjningen i manteln på kopparhöljet är fortfarande mindre än 20 procent, vilket innebär att den inte förväntas spricka. Efter cirka 700 000 år bedöms gasproduktionen sjunka på grund av att nästan allt järn har förbrukats och gasutsläppen genom bufferten upphör. Bufferten har deformerats lokalt i nedre delen av deponeringshålet. Berget är huvudsakligen utsatt för tryckspänningar, och bedöms inte skadas. De dragspänningar som förekommer kring deponeringshålet är mycket lokala.

Data till beräkningar av radionuklidtransport

Från den hydromekaniska utvecklingen i en skadad kapsel hämtas data för dels tidpunkten då en kontinuerlig vattenväg mellan bränsle och kapselns yttre utbildats, dels tidpunkten då den inre utvecklingen antas ha lett fram till att kapselns initialt lilla skada plötsligt växer till en större. Då den kontinuerliga vattenvägen utbildats startar radionuklidtransporten, men är begränsad av den lilla initiala skadan. Då den större skadan uppkommit antas kapseln inte längre erbjuda något motstånd mot radionuklidtransport. För båda tiderna behövs såväl rimliga som pessimistiska uppskattningar.

Som rimligt värde för tidpunkten då den initiala skadan övergår i en större väljs tiden 200 000 år, enligt redovisningen ovan. Fram till denna tid förväntas i det rimliga fallet inget vätskeformigt vatten finnas i kapseln och ingen radionuklidtransport förekommer. Då den initiala skadan övergår i en större antas också vatten kunna tränga in obehindrat och 200 000 år blir därför också den rimliga tidpunkt vid vilken en kontinuerlig vattenväg förväntas.

Pessimistiskt antas att en kontinuerlig vattenväg bildas redan efter 300 år. Den lilla initiala skadan antas då löpa kring hela svetsfogens periferi och vatteninströmningen blir därmed betydligt snabbare än i det rimliga fallet med en liten cirkelformad skada. Den kontinuerliga vattenvägen möjliggör radionuklidtransport ut genom den lilla initiala skadan. För skadetillväxten antas pessimistiskt att järnets korrosionshastighet är 1 µm/år, vilket ger en fullbordad skadetillväxt på 20 000 år.

Osäkerheter

Detaljerna i utvecklingen som skisseras ovan måste betraktas som mycket osäkra. De enda data som hämtas till beräkningar av radionuklidtransport är emellertid tiden för att utbilda en kontinuerlig vattenväg och tidpunkten då kapseln antas förlora sitt transportmotstånd.

Den förra bygger i det pessimistiska fallet enbart på ett analytiskt uttryck för inströmning av vatten genom ett hål där hålets form och buffertens hydrauliska konduktivitet är pessimistiskt valda och där inströmande vatten pessimistiskt inte antas omsättas till gas.

Tidpunkten då den lilla skadan övergår i en större och då kapseln antas helt förlora sitt transportmotstånd kan pessimistiskt gränssättas uppåt genom att anta att tiden enbart beror av korrosionshastigheten vid obegränsad vattentillgång, och kapselns hållfasthet. Genom att välja ett pessimistiskt värde även för korrosionshastigheten (1 µm/år) fås en tidpunkt som bör vara mycket pessimistisk.

3.3.4 Kemisk utveckling i defekt kapsel

Den kemiska utvecklingen i en skadad kapsel skiljer sig radikalt från den hos en intakt kapsel genom att inträngande vatten ger upphov till flera viktiga kemiska reaktioner, i huvudsak

- korrosion av gjutjärnsinsatsen,
- korrosion av bränslets Zirkaloykapsling och övriga metalledar med frisättning av radionuklider i dessa delar,
- upplösning av bränslematrisen med åtföljande frisättning av radionuklider, samt
- frisättning av omedelbart tillgänglig fraktion av radionuklider.

Sammansättningen hos inträngande vatten och de påföljande reaktionerna bestämmer tillsammans den kemiska miljön i kapseln. Den kemiska miljön i sin tur avgör hur frisatta radionuklider specieras, dvs vilken kemisk form de antar och därmed också i vilken utsträckning de förekommer i lös form tillgängliga för transport, eller fälls ut i kapseln. Specieringen har avgörande betydelse för radionuklidspridningen från en skadad kapsel.

Korrosion av gjutjärnsinsatsen

Grundvatten på förvarsdjup är syrefritt. Gjutjärnsinsatsen kommer därför att korrodera anaerobt under vätgasutveckling och bildning av magnetit. Ett magnetitskikt förväntas byggas upp på järnytan. Då skiktet nått tjockleken 0,7–1 µm förväntas korrosionshastigheten vara cirka 0,1 µm/år oberoende av bl a magnetitskiktets fortsatta tillväxt och av om vattnet är vätskeformigt eller i form av en gas mättad med vattenånga. Värdet används framför allt i analysen av den hydromekaniska utvecklingen ovan.

Korrosion av metalledlar och kapslingsrör

Bränslets metalledlar, som innehåller mindre mängder radionuklider, är mycket korrosionsbeständiga, men kunskapen och tillgängliga data är inte tillräckliga för att kvantifiera korrosionen i säkerhetsanalysen. Därför antas pessimistiskt hela inventariet av radionuklider i metalledlarna omedelbart frisättas då en kontinuerlig vattenväg utbildas och radionuklidtransport blir möjlig.

Detsamma gäller kapslingsrören av Zircaloy som omger bränslekutsarna. Här försummas pessimistiskt även rörens transportmotstånd.

Upplösning av bränslematrisen

Majoriteten radionuklider i bränslet ligger inbäddade i bränslematrisen av urandioxid och kan inte frigöras förrän matrisen har lösts upp eller omvandlats. I en säkerhetsanalys behövs därför en beskrivning av upplösning/omvandling av bränslematrisen.

Vid normala förhållanden i förvaret (reducerande miljö, neutralt till alkaliskt pH), har urandioxid en mycket låg löslighet i vatten. Om lösligheten antas vara den begränsande faktorn kommer upplösningen av bränslematrisen att gå mycket långsamt. Baserat på detta kan en löslighetsbegränsad modell för frigörandet av radionuklider ur bränslet formuleras.

Utöver denna upplösningsmekanism kan det också tänkas att oxidanter som bildas vid radiolys av vatten kring bränslematrisen kan leda till omvandling av bränslet så att inbäddade radionuklider frisätts. Baserat på detta kan en modell med bränsleomvandling till följd av radiolytisk oxidation formuleras. Detta ger ett ytterligare bidrag till upplösningen eftersom den förstnämnda mekanismen alltid förekommer.

Den stora tillgången till reducerande species i kapseln, framför allt Fe(II) och Fe(0), kan tänkas "neutralisera" effekterna av de oxidanter som alltid bildas till följd av radiolys. Något sådant är dock idag inte experimentellt eller teoretiskt bevisat. I SR 97 används därför en modell som förutsätter att bränslematrisen upplöses både till följd av dess "egen" löslighet och av de oxidanter som produceras genom radiolys av vatten.

En tidigare modell för radiolytisk oxidation har vidareutvecklats. I den nya modellen kvantifieras:

- radiolysprocesser i vattnet mellan bränsle och kapsling,
- en rad reaktioner mellan olika radiolysprodukter i vattnet samt mellan radiolysprodukter och löst väte från korrosion av insatsen, samt
- reaktioner mellan oxidanter och urandioxiden, dvs den direkta orsaken till bränsleupplösningen.

Modellberäkningarna är genomförda med ett standardprogram för modellering av radiolys. Simuleringar med modellen visar att systemet snabbt når ett stationärt tillstånd där upplösningshastigheten bestäms av bl a vätets partialtryck i kapseln och dosraten.

Med referensvärden på alla ingående parametrar beräknas andelen 10^{-8} av bränslet lösas upp varje år. Vätgashalten har avgörande betydelse för resultatet: Löst vätgas bildar via reaktioner med OH⁻ atomärt väte som förbrukar oxidanter som annars kan angripa bränslet. Redan ett tryck av 0,5 MPa räcker för att de begränsande effekterna av vätet ska bli påtagliga i beräkningarna.

Resultatet styrs också av rader av andra faktorer. Med variationsanalyser visas hur dosrat och hastigheten för oxidanters reaktion med bränslet påverkar resultatet.

Som rimligt värde används i radionuklidtransportberäkningar upplösningshastigheten 10^{-8} /år. Något pessimistiskt värde för upplösningshastigheten har inte valts. Osäkerheterna kring bränsleupplösningen är stora, både vad gäller förståelse, modeller och data. Upplösningshastigheten har dock begränsad betydelse i säkerhetsanalysen av flera skäl:

- Några nuklider i bränslet ansamlas delvis på bränslets yta och frigörs därmed även om matrisen är stabil. I-129 och Cl-36 är exempel på långlivade sådana nuklider.
- Andra nuklider finns i bränslets strukturdelar och frigörs i takt med att dessa korroderar, vilket bedöms vara en snabbare process än matrisupplösningen. Ni-59 och Ni-63 finns i strukturdelarna.
- Flera helt matristrogna nuklider, som plutonium, har mycket låga individuella lösligheter och faller ut i fasta faser även om matrisen löses upp snabbt. Detta ger en mycket långsam frigörelse av sådana nuklider.

I beräkningarna av radionuklidtransport illustreras betydelsen av bränsleupplösningen med ett speciellt beräkningsfall där upplösningen antas vara omedelbar.

Den modell som användes för säkerhetsanalysen SKB 91 överskattar kraftigt oxidationshastigheten för bränslet. Med ansatserna i SKB 91 blir bränsleupplösningshastigheten på lång sikt sådan att en fullständig upplösning kan förväntas om cirka 170 miljoner år. På lång sikt bör förhållandena i bränslet vara jämförbara med dem vid uranfyndigheten vid Cigar Lake vilken i stort sett är intakt ännu efter mer än en miljard år.

Modellen som används i SR 97 är ett försök att ge en fullständigare och mer realistisk beskrivning av den radiolytiska oxidationen av bränslet. Om antagandena i den modellen skulle tillämpas på Cigar Lake skulle detta ge en fullständig oxidation på 100 miljoner år. Detta antyder att modeller med radiolytisk oxidation överskattar oxidationen för långa tidsförlopp.

Kemisk speciering av radionuklider, lösligheter

Inför SR 97 har ett omfattande arbete gjorts för att bestämma lösligheter och de osäkerheter som är förknippade med dessa:

- Utvärdering av betydelsen av den naturliga sammansättningen av grundvattnet och den relativa betydelsen av olika specier, för att få en uppfattning om vilka komplex och fasta faser som kommer att dominera.
- En litteraturstudie över halter av (stabila isotoper av) de viktiga radioelementen, för att bedöma rimligheten i de framräknade lösligheterna.
- Genomgång av tillgängliga data från bränslelaksförsök av halter av icke-naturliga radioelement för att också där få en uppfattning av rimligheten i de framräknade lösligheterna.
- Beräkning av lösligheter för alla tre referensvattnen i SR 97 samt ett antaget bentonitporvatten.
- Jämförelse av de framräknade resultaten med naturliga halter, halter i laktlösningar samt resultat från andra säkerhetsanalyser.

- En känslighets/osäkerhetsstudie för att bestämma vilka faktorer som är viktiga för lösligheten för varje radionuklid.

Baserat på studien har platsspecifika rimliga och pessimistiska data valts för nuklidtransportberäkningarna. De pessimistiska värdena har valts utifrån resultaten från variationsanalyserna.

I löslighetsberäkningarna i SR 97 har genomgående ”pålitliga”, pessimistiska löslighetsbegränsande faser valts. De verkliga koncentrationerna av radionuklider i en vattenfylld kapsel kan i många fall vara flera storleksordningar lägre än de som används i radionuklidtransportberäkningarna. Känslighetsanalyser med avseende på grundvattnets sammansättning visar att lösligheterna i de flesta fall är relativt okänsliga även för betydande förändringar i vattensammansättning. Detta är viktigt eftersom grundvattensammansättningen i förvaret kommer att förändras under dess livslängd.

Lösligheter beräknas för olika specier i referensvattnen för Aberg, Beberg, Ceberg, och för ett speciellt bentonitvatten. Även känslighet för variationer i pH, Eh, karbonathalt och temperatur beräknas.

Rimliga värden för lösligheterna väljs från lösligheterna som beräknats för respektive referensvatten, men om lösligheten för något ämne är högre i bentonitvattnet väljs detta värde som det rimliga.

Med tanke på osäkerheten i den framtida kemiska miljön inne i kapseln väljs de pessimistiska lösligheterna genom att för respektive ämne väljs den högsta lösligheten som beräknats för någon av de olika vattensammansättningarna. Om känslighetsberäkningarna visar att lösligheterna skulle kunna vara ännu större väljs dessa värden.

3.3.5 Hydraulisk utveckling i geosfären

Grundvattenrörelserna och deras förändringar i tiden bestäms av geosfärens hydrauliska egenskaper och förhållanden i omgivningen, framför allt nederbörden som i sin tur beror av klimatet. Eftersom dessa faktorer postuleras vara desamma som i basscenariot förväntas också samma hydrauliska utveckling som i basscenariot, dvs:

- ett inledande transient skede där geosfären efter förvarets förslutning återmättas med vatten,
- följt av ett långsiktigt skede där förhållandena liknar de ostörda, naturliga som rådde innan förvaret byggdes. Dessa förhållanden förväntas vara väsentligen oförändrade över lång tid med undantag för kända trender som landhöjning.

Beskrivningen av den hydrauliska utvecklingen i den regionala skalan för de tre platserna i basscenariot är alltså giltig även för kapseldefektscenariot.

För kapseldefektscenariot krävs i en lokal skala (upp till cirka en kilometer) en mer detaljerad beskrivning av det långsiktiga skedet än vad som gavs i basscenariot. Den större detaljeringsgraden är viktig för att ge en god beskrivning av eventuell radionuklidtransport från förvaret.

Modellen HYDRASTAR är huvudalternativet för beräkningar i den lokala skalan. HYDRASTAR är en sk finit differensmodell för stokastisk kontinuumsimulering av grundvattenströmning. I modellen delas bergvolymen in i element som tilldelas hydrauliska egenskaper baserat på en tredimensionell hydrogeologisk beskrivning av bergmassa och sprickzoner. Beskrivningen i sin tur bygger på observationer och

mätningar. Den hydrogeologiska beskrivningen har statistiska inslag och också elementen tilldelas hydrauliska egenskaper stokastiskt.

En mängd realiseringar används för att belysa osäkerheter i ett givet beräkningsfall. I varje realisering och för varje element väljs de hydrauliska egenskaperna slumpmässigt ur givna fördelningar. Momenten som leder från faktiska mätningar till indata till HYDRASTAR har flera led av expertbedömningar och tolkningar.

Elementen i HYDRASTAR är kuber med sidan 25 meter för Aberg och 35 meter för Beberg och Ceberg. Medelvärdena för den hydrauliska konduktiviteten för bergmassan i Aberg och Beberg är omkring två storleksordningar högre än för Ceberg. Detsamma gäller för sprickzonerna.

I modellen läggs tunnelpositionerna i det tänkta förvaret in och de igenfyllda tunnarna antas ha en hydraulisk konduktivitet av 10^{-10} m/s medan den störda zonen är försummad. Med de använda elementstorlekarna är effekten av att försumma zonen minimal.

Drygt etthundra representativa kapselpositioner läggs in i modellen och för var och en av dessa beräknas i varje realisering:

- specifikt vattenflöde (darcyhastighet) på förvarsdjup [$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$],
- advektiva gångtider från kapselpositioner till randen mellan geosfär och biosfär (år),
- koordinater för utsläppspunkter vid markytan.

Den advektiva gångtiden är en teoretisk storhet som används för att föra över beräkningsresultat från hydromodeller till transportmodeller. Där kan gångtiderna användas för att beräkna tiden för transport av lösta ämnen från förvarsdjup till ytan. Dessa är ofta flera storleksordningar längre än de advektiva gångtiderna.

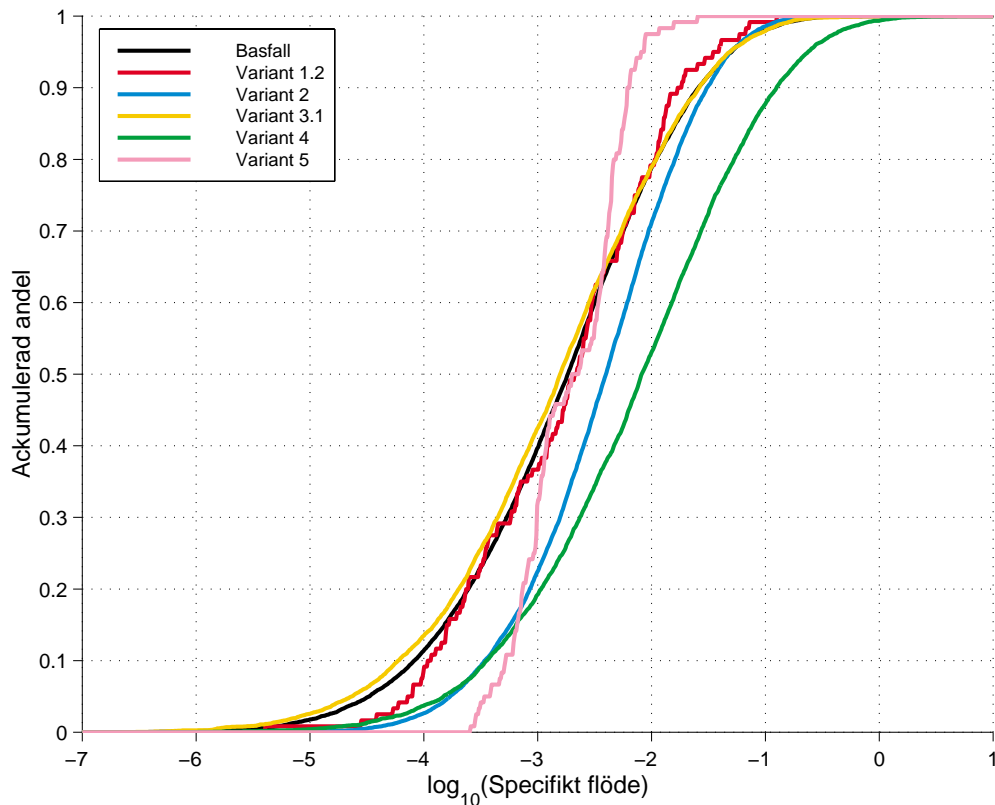
Randvillkoren för beräkningarna tas från resultaten av den regionala modelleringen som beskrevs i basscenariot. Beräkningsresultatet används sedan som indata vid beräkning av radionuklidtransport i geosfären, se avsnitt 3.3.8.

Resultat Aberg

För Aberg finns ett basfall där data i princip valts för att ge en så rimlig beskrivning som möjligt. Dessutom har fem varianter definierats av en grupp experter för att belysa frågor kring modellerna och egenskaper hos systemet:

1. Alternativa randvillkor.
2. Uppskalning av hydraulisk konduktivitet.
3. Anisotropi i statistisk beskrivning av hydraulisk konduktivitet.
4. Hydraulisk konduktivitet betingad på mätdata.
5. Deterministisk simulering med konstant konduktivitet inom varje enskild domän för bergmassa och sprickzoner.

I figur 3-8 visas resultaten för specifika flöden för basfall och varianter. Resultaten representerar statistik över samtliga realiseringar och samtliga kapselpositioner.



Figur 3-8. Specifikt flöde för basfall och varianter vid Aberg.

Figur 3-8 visar att basfall och varianter är snarlika både vad gäller fördelningarnas läge och spridning. Bredden hos de enskilda fördelningarna i figur 3-8 representerar den osäkerhet som den naturliga variabiliteten kombinerat med den slumpmässiga kapselpositionen ger. Figuren visar att denna kombination av osäkerheter är betydligt större än spridningen mellan varianterna. En övergripande slutsats är därför att effekter av den rumsliga variabiliteten dominerar över de osäkerheter som beror på antaganden om egenskaper hos systemet.

Analys av enskilda kapselpositioner ger smalare fördelningar. En del av variationsbredden i figur 3-8 bör alltså bero på skillnader mellan olika startpositioner. Analysen av enskilda kapselpositioner visar också att olika kapselpositioner inom förvaret har systematiskt olika medelgångtider och specifika flöden. Sådan information skulle kunna användas för att i viss mån optimera förvaret genom att undvika ogynnsamma positioner. Detta har inte gjorts i SR 97.

Resultat Beberg

För Beberg har ett basfall och fyra varianter analyserats:

1. Randvillkor från en regionalmodell med salinitetseffekter.
2. Alternativa konduktiva strukturer (fler sprickzoner).
3. Alternativ hydrogeologisk tolkning.
4. Deterministisk simulering med konstant konduktivitet inom varje enskild domän för bergmassa och sprickzoner.

Även för Beberg är det övergripande resultatet att resultaten från basfall och varianter är snarlika. Basfallets resultat är också jämförbara med resultaten från säkerhetsanalysen SKB 91 där Beberg analyserades.

Resultat Ceberg

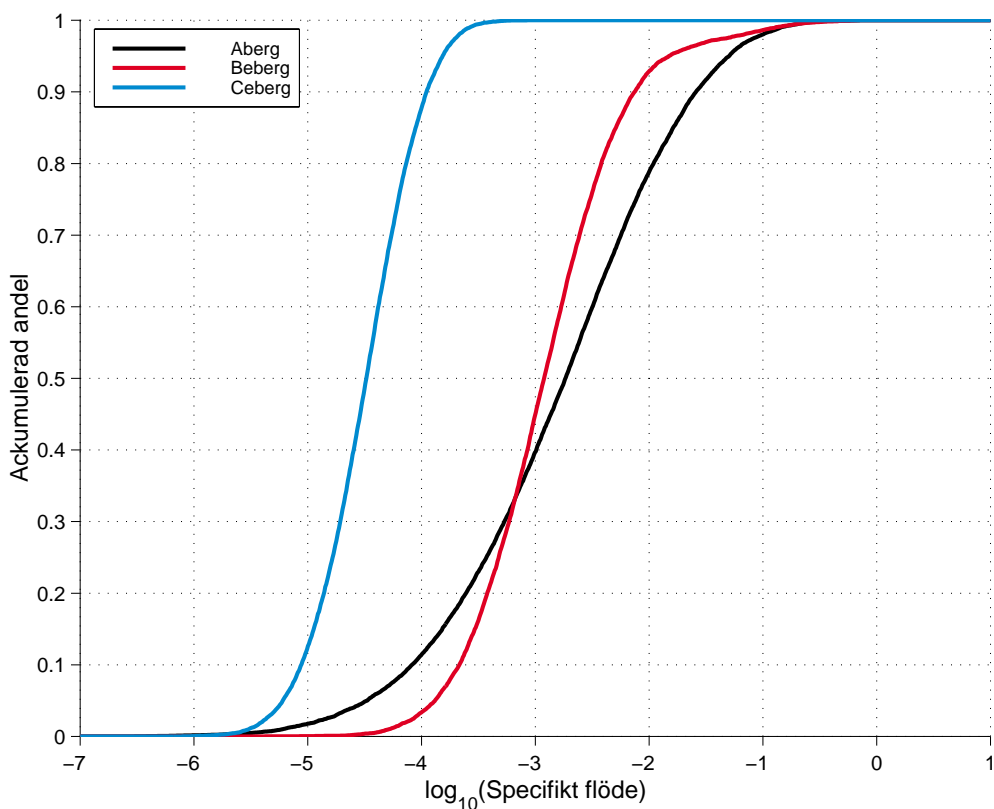
Också för Ceberg har utöver ett basfall fyra varianter analyserats:

1. Kontrast i hydraulisk konduktivitet mellan domäner för bergmassa och sprickzoner ökad med en faktor 100.
2. Alternativa konduktiva strukturer.
3. Ökad varians i hydraulisk konduktivitet.
4. Deterministisk simulering med konstant konduktivitet inom varje enskild domän för bergmassa och sprickzoner.

Resultaten visar att basfallet inte täcker upp samtliga varianter lika väl som vid Aberg och Beberg. Skillnaderna mellan varianterna är dock fortfarande mindre än skillnaden inom basfall och inom enskilda varianter.

Jämförelse mellan platserna

I figur 3-9 jämförs specifika flöden i basfallen för de tre platserna. Aberg och Beberg har medelvärden av samma storleksordning medan Ceberg ligger ungefär två storleksordningar lägre. Aberg har störst spridning medan Ceberg har minst.



Figur 3-9. Specifika flöden för basfallen i Aberg, Beberg och Ceberg.

Osäkerheter

Lokalmodellernas syfte är att ge en förståelse av den hydrauliska situationen vid platsen. Modellerna är behäftade med osäkerheter orsakade av bl a

- det valda modellkonceptet,
- rumslig variabilitet, samt
- ofullständiga data om platsens geologiska strukturer och ofullständig kunskap om andra styrande egenskaper.

Konceptuell modellosäkerhet: För att analysera konceptuell modellosäkerhet har förutom HYDRASTAR också den diskreta spricknätverksmodellen FracMan/MAFIC/PAWorks och kanalnätverksmodellen CHAN3D använts för Aberg.

Samtliga modeller ger likvärdiga gångtider och specifika flöden på förvarsnivå. Speciellt resultatet för median av gångtid och median av specifikt flöde är mycket lika. Även om spridningen är större i HYDRASTAR än i FracMan och CHAN3D ger modellerna liknande värden för de kortaste gångtiderna och högsta flödena. Även utsläppspunkternas lägen blir snarlika i de tre modellerna.

Resultatet tyder på att problemförutsättningarna snarare än den valda modellen styr resultatet, dvs att den konceptuella osäkerheten är låg. HYDRASTARs basfall och varianter i figur 3-8 täcker i stort in hela bredden av resultat från de olika modellerna.

Rumslig variabilitet: För samtliga platser visas att geofärens heterogenitet i kombination med den slumpmässigt valda positionen för en skadad kapsel ger de största osäkerheterna i gångtider och specifika flöden.

Osäkerheter i data och egenskaper: Osäkerheter betingade av ofullständiga data och kunskap om egenskaper hos systemet analyseras genom att jämföra ett basfall med ett antal varianter. Resultaten visar att skillnaderna mellan olika varianter oftast är liten. Salinitetseffekter vid Beberg utgör ett undantag där den dominerande strömningsriktningen påverkas kraftigt av salinitetseffekter.

Separata studier visar att de storheter som förs över till radionuklidberäkningar bara förändras marginellt också av landhöjning.

De beräknade skillnaderna i gångtider och specifika flöden mellan platserna kan förklaras av skillnader i hydrogeologiska förhållanden och data som använts i beräkningarna. Uppmätta skillnader mellan platserna beror sannolikt på en kombination av verkliga fysiska skillnader och det faktum att olika undersökningsmetodik använts för olika platser.

Kommande arbete

I SR 97 har möjligheten att välja bort deponeringspositioner baserat på resultatet av hydroberäkningar inte utnyttjats. Ett sådant förfarande skulle kräva dels en utveckling av metod och kriterier, dels hydromodellering i en mer detaljerad skala. Detta kommer att övervägas i framtida revideringar av SKB:s FUD-program.

3.3.6 Transportprocesser i förvaret

De processer som kan leda till att radionuklider kan lösas upp i vattnet i en skadad kapsel har diskuterats i tidigare avsnitt. Vattenlösta radionuklider kan transporteras i kapselns inre, huvudsakligen genom diffusion och därigenom via skadan nå bufferten.

Efter vattenmättnad förväntas radionuklidtransport i bufferten ske uteslutande genom diffusion i buffertens porer, möjligen också på lerpartiklarnas ytor. Varken advektion eller kolloidtransport förekommer på grund av buffertens egenskaper. Radionuklider kan sorberas till montmorillonitens ytor. Avgörande för detta är radionuklidens kemiska form som bestäms av den kemiska miljön i bufferten genom processen speciering.

I berget kan radionuklider transporteras med det strömmande grundvattnet, advektion. Även diffusion kan vara betydelsefull under stagnanta förhållanden. En viktig aspekt av detta är matrisdiffusion dvs att radionuklider diffunderar in i det stagnanta vattnet i bergets mikrosprickor och på så sätt undandras och transporteras långsammare än det flödande vattnet. Tidsskalan för advektion relativt tidsskalan för matrisdiffusion bestämmer den senare processens relativa betydelse. Av avgörande betydelse för radionuklidtransporten är även sorption, dvs det faktum att radionuklider kan sorbera (fastna) på spricksystemets och bergmatrisens ytor. Matrisdiffusion och sorption är de två viktigaste retentionsprocesserna för radionuklider i geosfären. En annan faktor som kan ha betydelse för retentionen är sorption på kolloidala partiklar och transport med dessa. Den kemiska miljön i vattnet bestämmer vilken speciering (kemisk form) radionukliderna kommer att ha, vilket är avgörande speciellt för sorptionsfenomenen. Vissa nuklider kan transporteras i gasfas.

Det radioaktiva sönderfallet slutligen påverkar innehållet av radionuklider i hela systemet och måste därför inkluderas i beskrivningen.

Kunskapen om samtliga dessa processer har utvärderats i Processrapporten och i Data-rapporten föreslås rimliga och pessimistiska värden för de data som krävs för att kvantifiera processerna.

3.3.7 Biosfären

I kapseldefekts scenariot analyseras spridning av radionuklider från förvaret till människa och natur i förvarets närhet. Därför krävs en betydligt mer detaljerad analys av biosfärförhållandena än vad som är fallet för basscariot.

Biosfären är i jämförelse med förvarssystemet (bränsle, kapsel, buffert/återfyllning och geosfär) betydligt mer heterogen, komplex och föränderlig. Det är därför svårt att genomföra en lika strikt och uttömmande processbeskrivning för biosfären som för övriga delar. Radionuklidomsättning i biosfären styrs dock av en begränsad uppsättning processer som översiktligt låter sig beskrivas i generella termer.

Den kvantitativa beskrivningen beror av i vilket ekosystem processerna äger rum. För att kvantifiera radionuklidomsättning för säkerhetsanalysen beräknas först spridningen i ett antal typiska ekosystem för enhetliga radionuklidutsläpp till dessa, sedan uppskattas dosen till människor. Beräkningarna ger en ekosystemspecifik doskonverteringsfaktor (ett EDF-värde), för varje ekosystem och nuklid. EDF-värdet uttrycker vad ett kontinuerligt radionuklidutsläpp till ekosystemet (Bq/år) ger för kontinuerlig dosbelastning (Sv/år) till människor i omgivningen då utsläppet pågått i 10 000 år. Enheten för EDF-värdet blir därmed Sv/Bq.

För tillämpningen i säkerhetsanalysens beräkningar delas de tre förvarsplatserna in i mindre områden och varje område klassificeras som något av typekosystemen. Därefter kan platsspecifika och tidsberoende utsläpp av radionuklider till biosfären omvandlas till uppskattningar av doser till människa.

Beräkning av ekosystemspecifika dosomvandlingsfaktorer (EDF)

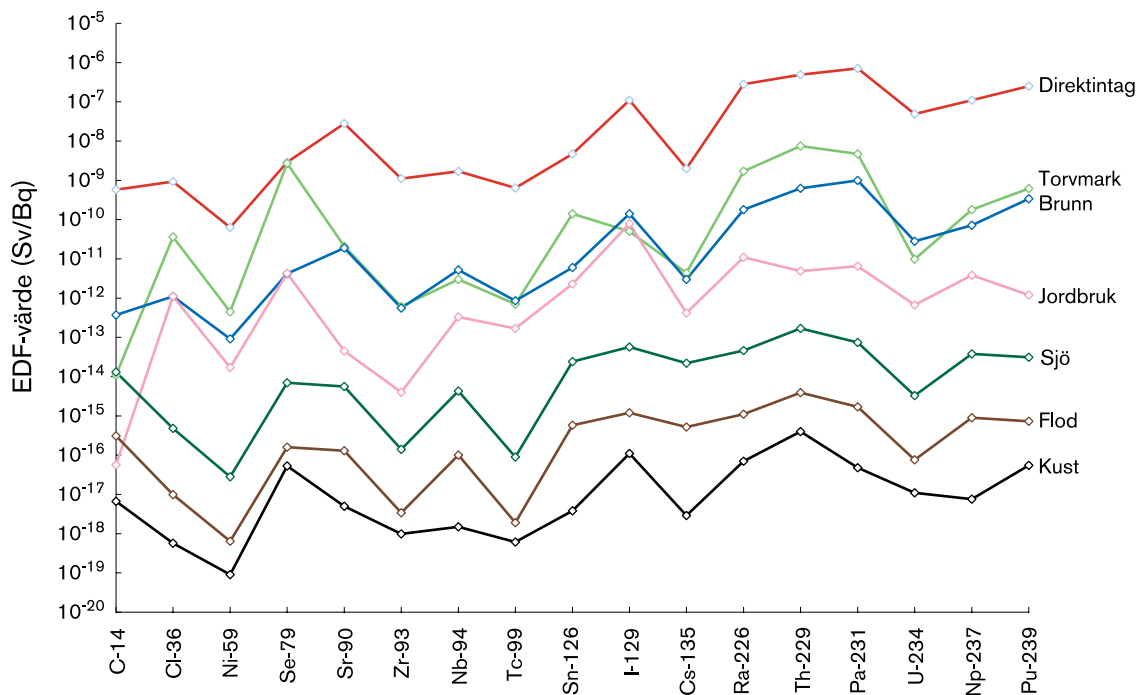
I SR 97 modelleras radionuklidspridning och dosbelastning i ett antal typekosystem:

- kust och skärgårdsområde,
- sjö,
- rinnande vatten, bäck, flod,
- våtmarker, torvmossar,
- jordbruksmark,
- brunn.

Skog har ansatts som likvärdig med torvmark, vilket bedöms vara pessimistiskt.

EDF-värden

Resultatet av beräkningarna av de ekosystemspecifika doskonverteringsfaktorerna för brunn, jordbruksmark, torvmark, kust, sjö och flod visas i figur 3-10. I figuren finns också för jämförelse dosomvandlingsfaktorer för direktintag av respektive nuklid med föda.



Figur 3-10. EDF-värden för ett urval radionuklider i olika typekosystem. Direktintag avser dosomvandlingsfaktorn vid intag med föda utan utspädning.

Av figuren framgår att EDF-värdena för många typekosystemen skiljer sig med en faktor som i stort sett är oberoende av radionuklid. Formen för dessa kurvor liknar dessutom den för direktintag via föda utan utspädning. Anledningen till likheterna är att varierande utspädning är den faktor som skiljer modulerna mest från varandra och denna faktor påverkar alla nuklider lika. För torvmark och jordbruksmark ackumuleras vissa radionuklider under längre tid och utspädningen är långsammare, därför avviker dessa ekosystem från mönstret.

Beskrivning och klassificering av platsernas typekosystem

Aberg: Idag dominerar typekosystemet för skärgård och öppen kust. Skogsmark och torvmarker utgör också en stor andel av ekosystemen. Små delar av området är jordbruksmark medan sjöar saknas. Det finns idag tre brunnar i området med en medelkapacitet av 300 liter per timme.

Landhöjningen förväntas förändra situationen och om 2 000–5 000 år är sannolikt torvmarker det dominerande ekosystemet.

Beberg: Skog är det dominerande ekosystemet följt av våtmarker och jordbruksområden. Sjöar och vattendrag finns också. Dessutom finns fyra brunnar med medelkapaciteten 1 000 liter per timme. Eftersom skogsmarken pessimistiskt ersätts av torvmarker i modelleringen kommer EDF-värdet för torvmark att dominera.

Landhöjning och igenväxning förväntas inte förändra dagens situation påtagligt.

Ceberg: Området genomkorsas av två större vattendrag. Vid ett av dessa förekommer mindre områden av odlad mark. Torvmarker och skog är de dominerande ekosystemen. Detta leder till att typekosystemet torv dominerar i området. Vattendrag och jordbruk förekommer också frekvent. Två brunnar med den genomsnittliga kapaciteten 500 liter per timme finns också.

Landhöjningen förväntas inte påverka fördelningen av dominerande ekosystem vid Ceberg.

Vilket acceptanskriterium?

Vid beräkningar av EDF-värden antas för typekosystemen torvmark, jordbruk och brunn att utsläpp av radionuklider till biosfären sprids inom ett lokalt område av ungefär samma storlek som de delområden som använts vid indelningen av biosfären på de tre platserna (250 m x 250 m). Inom detta område antas de boende utvinna all sin föda och hämta allt sitt dricksvatten.

Beräkningarna omfattar för åtminstone dessa tre typekosystem alltså endast de mest exponerade individerna inom en större region. Det acceptanskriterium som beräkningsresultat bör jämföras mot då dessa EDF-värden används är således en risk av 10^{-5} , dvs en risk för de mest utsatta människorna i en population. Uttryckt i dos motsvarar denna risk $1,5 \times 10^{-4}$ Sv/år för en exponering som säkert inträffar.

För typekosystemen kust, sjö och rinnande vatten kan det i vissa fall vara stora populationer som exponeras vilket gör det rimligare att jämföra med risken 10^{-6} , vilket svarar mot dosen $1,5 \times 10^{-5}$ Sv/år för en exponering som säkert inträffar.

Osäkerheter

Den använda metodiken att dela upp platserna i delområden gör att osäkerheterna i de ytnära ekosystemen kan separeras i dels frågan om vilket ekosystem som kommer att vara utströmningsområde, dels i osäkerheter i indata för beräkningsmodellerna för varje typekosystem.

En beskrivning av de ytnära ekosystemen vid framtida platsundersökningar kan bidra till att reducera osäkerheterna. Biosfärens föränderlighet ger dock en fundamental begränsning i noggrannheten i biosfärsbeskrivningar som ska användas för att uppskatta radionuklidomsättning långt in i framtiden.

Troligen har skogsmark EDF-värden mellan jordbruksmark och torvmossar för de flesta radionuklider. Därför är klassificeringen till torvmark för skog troligtvis en överskattning av potentiella doser.

De högsta EDF-värdena fås för typekosystemen torvmark, brunn och jordbruksmark. I brunnsfallet är dricksvatten en dominant exponeringsväg för aktinider. För de biologiskt mer tillgängliga klor-, jod- och cesiumisotoperna ger konsumtion av födoämnen högre doser än konsumtion av vattnet för brunnsfallet.

Även sannolikheterna för de olika exponeringsvägarna i respektive ekosystem behöver övervägas. Torvmarken kräver t ex flera steg av mänskliga aktiviteter innan höga EDF-värden uppstår. Modellen för jordbruksmark beskriver däremot en mer trolig utveckling liksom beräkningsmodellen för utströmning i ytvatten.

Sammantaget betyder detta att konsekvenser som uppskattats i SR 97 troligen överskattar riskerna betydligt. Med bättre förståelse för dominerande ekosystem och reviderade beräkningsmodeller bör de flesta EDF-värdena reduceras.

Kommande arbete

Beräkningsmodellerna för varje typekosystem behöver ses över, bl a i ljuset av nya föreskrifter. En modell behöver utvecklas för skogsmark.

3.3.8 Beräkningar av radionuklidtransport

Beräkningar av radionuklidtransport utgör en omfattande del av säkerhetsanalysen för ett djupförvar. Beräkningarna ska beskriva ett stort antal kopplade processer i förvaret, omgivande berg och biosfären. De kräver ett stort dataunderlag och resultaten blir relativt omfattande och komplexa. I detta avsnitt redovisas beräkningar av radionuklidtransport för kapseldefektscenariot. Syftet med beräkningarna är i korthet att

- kvantitativt beskriva radionuklidtransport för detta scenario,
- illustrera betydelsen av osäkerheter i indata och visa vilka data som har störst inverkan på beräkningsresultaten,
- jämföra risken förvaret orsakar vid de tre platserna med givna acceptanskriterier,
- illustrera betydelsen av enskilda barriärerna i förvarssystemet.

Först redovisas beräkningsmodellerna och tilltron till att modellerna korrekt fyller sitt syfte och därefter formuleras ett antal beräkningsfall med hänsyn till syftena ovan. Beräkningsresultaten redovisas och avsnittet avslutas med en resultatdiskussion.

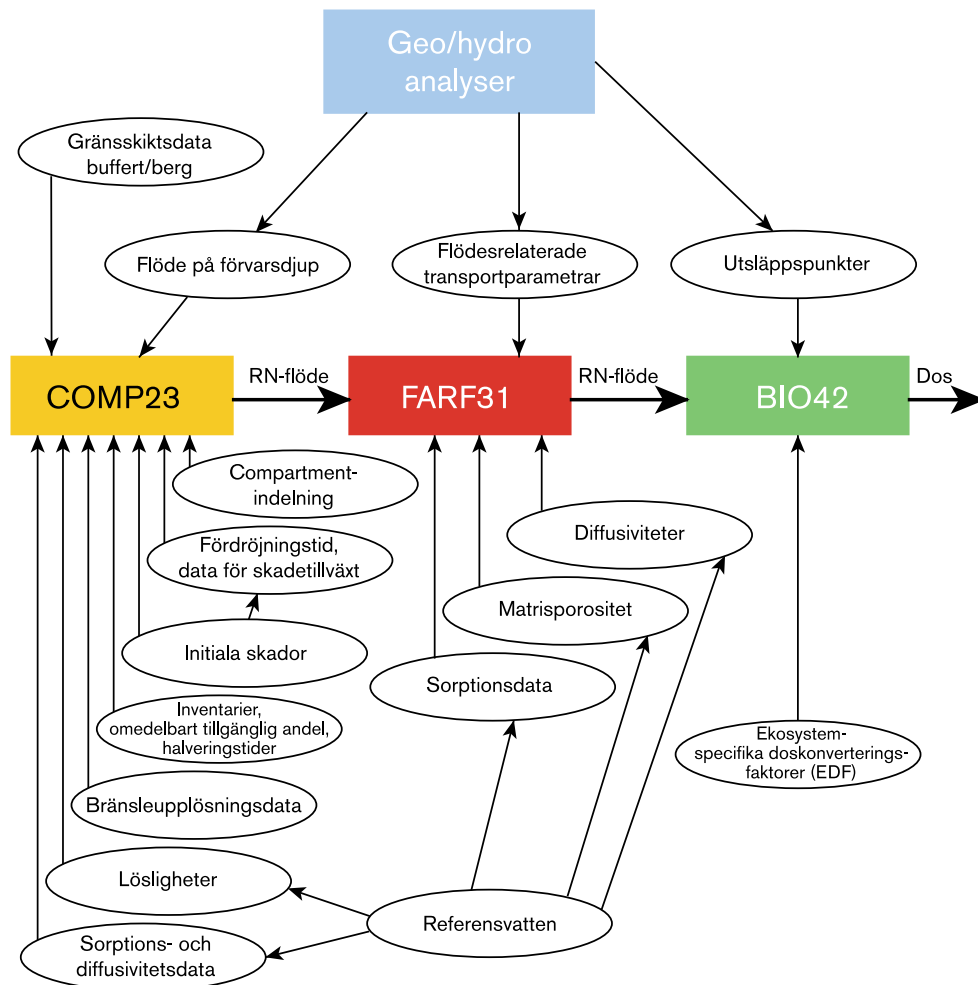
Beskrivning av transportmodellerna

Radionuklidtransporten beräknas med närområdesmodellen COMP23, fjärrområdes-transportmodellen FARF31 och dosmodellen BIO42, se figur 3-11. Indata till modellerna kommer i sin tur från olika mer eller mindre komplexa modellberäkningar eller data-analyser av olika förhållanden eller fenomen.

Närområdesmodellen COMP23 är en s k compartmentmodell. COMP23 beräknar hur nuklider i en skadad kapsel frigörs från bränslet, hur dessa eventuellt fälls ut på grund av löslighetsbegränsningar, hur nukliderna diffunderar genom skadan hos kapseln, vidare genom bufferten och hur de längs olika vägar förs över till det strömmande grundvattnet i bergets sprickor. Kedjesönderfall beräknas i bränslet och längs alla transportvägar.

FARF31 är en s k dubbelporositetsmodell som används för att beräkna transport av de utsläppta radionukliderna genom berget. Modellen beräknar transporten längs den tänkta strömväg som beskrivs av en fiktiv partikel som följer med grundvattenströmningen genom berget. Modellen hanterar advektion, dispersion, matrisdiffusion, sorption i berg-matrisen samt kedjesönderfall.

Den slutgiltiga dosberäkningen sker med modellen BIO42 som beräknar en dos genom att multiplicera utsläppet från FARF31, med ett EDF-värde (Sv/Bq). Dosomvandlings-faktorn bestäms av vilken typ av biosfär utsläppet sker till.



Figur 3-11. Modellerna för radionuklidtransport.

Tilltro till modellerna för grundvattenströmning och transport

Tilltron till att modellerna i säkerhetsanalysen med använda data korrekt beskriver relevanta fysikaliska processer, är viktig för tilltron till resultatet av modellberäkningarna. Modellerna för grundvattenströmning och radionuklidtransport används direkt för att kvantifiera förvarets säkerhet i utsläppsberäkningar och här blir frågan om tilltro särskilt viktig.

I den fullständiga versionen av huvudrapporten diskuteras tilltron till dessa modeller bl a mot bakgrund av den pågående internationella diskussionen om hur frågan om tilltro bör hanteras.

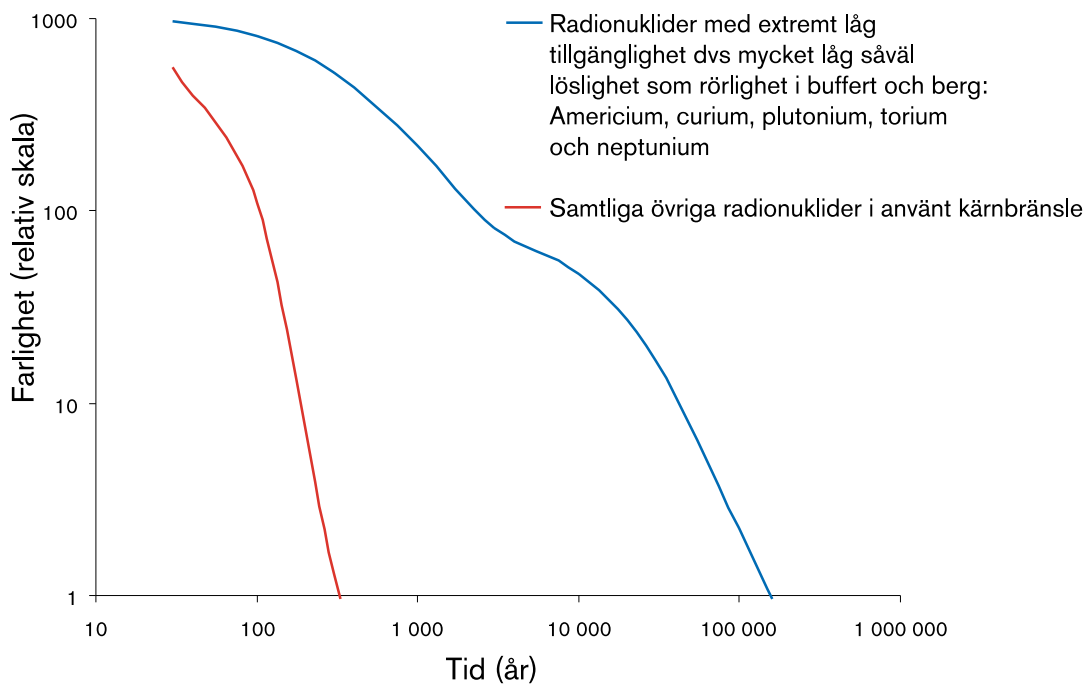
För grundvattenströmningsmodellen HYDRASTAR är slutsatsen att tilltron är god till att modellen korrekt fyller sitt syfte i SR 97. För transportmodellerna COMP 23 och FARF 31 bedöms tilltron som god att modellerna säkert inte underskattar konsekvenserna av transportprocesserna i förvaret. Också tilltron till att de beräknade EDF-värdena inte underskattar doser till människor bedöms som god, trots att mekanismerna i en del ekosystem är bristfälligt beskrivna.

Vad händer i transportmodellerna?

Transportmodellerna är byggda för att säkert inte underskatta de utsläpp som beräknas. Modellerna ger därför en förenklad och pessimistisk bild av utvecklingen. Här följer en kortfattad beskrivning av det förlopp som kvantifieras i transportmodellerna, som en inledning till presentationen av resultaten av beräkningsfallen.

1. Innan en kontinuerlig vattenväg utbildats mellan bränslet och skadan i kapselns kopparhölje sker inga utsläpp från kapseln. Det radioaktiva sönderfallet gör att radionuklidinnehållet i bränslet minskar och att den samlade farligheten avtar.
2. I samma ögonblick en kontinuerlig vattenväg utbildats löses den omedelbart tillgängliga andelen av inventariet i vattnet. Om löslighetsgränsen uppnås stiger inte koncentrationen av den lösta nukliden i vattnet ytterligare. De nuklider som lösts i vattnet börjar diffundera ut ur kapseln. För nuklider som ligger inbäddade i bränslet bestäms frisättningstakten av bränsleupplösningshastigheten. Även här begränsar nuklidernas lösligheter den koncentration som kan uppkomma i vattnet.
3. Nukliderna sorberas med varierande effektivitet i bufferten och sorptionsegenskaperna avgör tiden för diffusion genom bufferten. Om denna är kortare än eller jämförbar med halveringstiden tränger nukliden vidare ut i berget.
4. I berget avgör nuklidens sorptionsegenskaper tillsammans med bergets transportegenskaper (flödet och sprickstrukturen) tiden för transport genom berget till biosfären. På samma sätt som i bufferten avgör halveringstiden om nukliden hinner tränga genom geosfären innan den sönderfaller.
5. I biosfären ger nukliden upphov till en dos som beror av dess inneboende hälsofarlighet och av hur den omsätts i den biosfärstyp den släpps ut till. Båda dessa faktorer är inkluderade i EDF-värdet.

Generellt gäller att nuklider som har en relativt sett hög omedelbart tillgänglig andel också tenderar att vara lättlösliga och relativt lätttrörliga i såväl buffert som berg. För I-129 är t ex flera procent av inventariet omedelbart tillgängligt, jod har mycket hög löslighet och sorberas inte i vare sig buffert eller berg. Plutoniumisotoper å andra sidan ligger helt inbäddade i bränslematrisen, har en låg löslighet och sorberas starkt i både buffert och berg. Isotoper av uran, torium och americium har liknande egenskaper som



Figur 3-12. Farlighet för använt kärnbränsle uppdelad i nuklider med extremt låg tillgänglighet och övriga.

plutonium. Det är också, i mycket generella termer, så att farligheten är mindre för de lätttrörliga nukliderna.

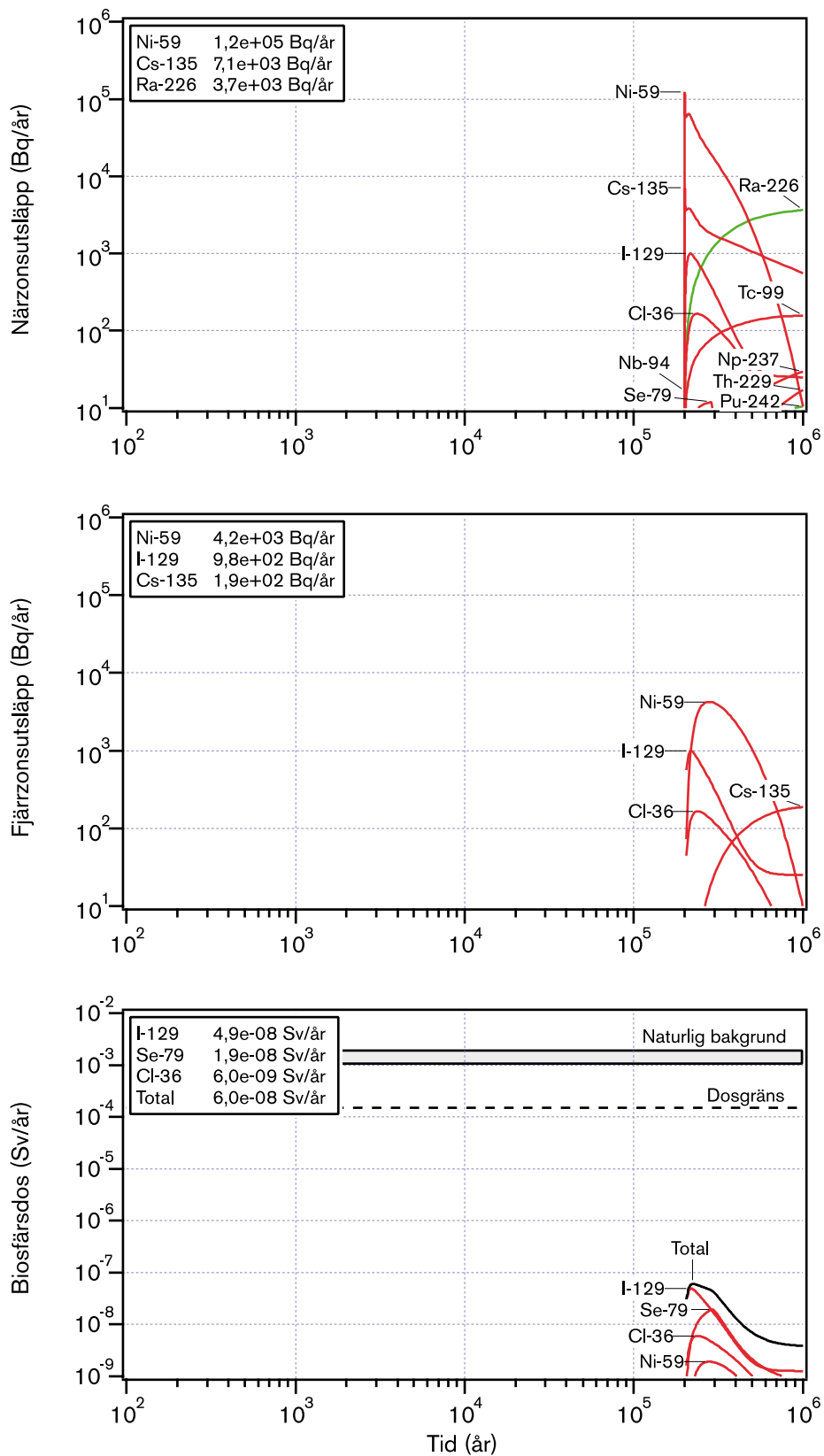
Figur 3-12 illustrerar översiktligt att farligheten på lång sikt domineras av nuklider som både är svårslösliga och har låg rörlighet i buffert och berg.

Beskrivningen ovan ger en grov bild av händelseutveckling och konsekvenser. De kvantitativa detaljerna bestäms av de indata som väljs i ett beräkningsfall. Den följande redovisningen av olika beräkningsfall är fokuserad på de nuklider som ger störst bidrag till utsläppen. Många av de farligaste nukliderna som isotoper av americium, plutonium och torium syns inte i redovisningarna, eftersom förvarets fördröjande förmåga är mycket god för dessa.

Rimliga fall för Aberg, Beberg och Ceberg

Figur 3-13 visar resultaten från beräkningarna för Aberg där alla data valts som rimliga. Beräkningen gäller därmed **en** kapsel, med en initial skada som efter 200 000 år vuxit så att en kontinuerlig vattenväg till bränslet utbildats. Därmed startar också bränsleupplösning och radionuklidtransport efter 200 000 år. Många radionuklider har efter denna tid sönderfallit fullständigt. Endast mycket långlivade nuklider, och i första hand de som har en omedelbart tillgänglig fraktion släpps ut. Den skadade kapseln är placerad i ett deponeringshål med medianvärden för flöden och advektiva gångtider.

Biosfären är en torvmosse med rimliga EDF-värden. Med dagens flödessituation vid Aberg förväntas de flesta utsläppen till Östersjön. Den pågående strandlinjeförskjutningen gör att utsläppen från några tusen år in i framtiden kan förväntas till landområden. Torvmossen är den "landmodul" som beräknas ge de högsta doserna, samtidigt som den inte kan betraktas som osannolik. Därför har denna valts som det rimliga fallet på sikt för Aberg.



Figur 3-13. Utsläpp från närzon och fjärrzon samt doser i biosfären som funktion av tid i Aberg. Alla data valda som rimliga. De inlagda rutorna visar maximala utsläpp och doser för dominerande nuklider.

För alla tider ligger doserna långt under doser från naturlig bakgrundsstrålning i Sverige. Doskurvan domineras av I-129, en långlivad, ickeorberande nuklid med en relativt hög omedelbart tillgänglig andel.

I biosfärsfiguren visas också en dosgräns om 0,15 mSv/år. Det är den dos som svarar mot risken 10^{-5} /år om exponeringen säkert inträffar. 10^{-5} /år är den riskgräns som tolkats som den relevanta att använda för bl a brunn- och torvmodulerna i SR 97, se avsnitt 3.3.7.

Motsvarande fall för Beberg och Ceberg är mycket likartade, särskild för närzonsutsläppen. Geosfärens retentionsegenskaper för bl a Ni-59 och Cs-135 är bättre i Beberg och Ceberg. Här domineras geosfärsutsläppen av de lättörliga nukliderna I-129 och Cl-36 där liksom i Aberg nästan hela närzonsutsläppet tränger igenom geosfären. Doskurvorna (torvmosse även i Beberg och Ceberg) blir likartade på samtliga platser eftersom I-129 dominerar.

Osäkerhetsanalys

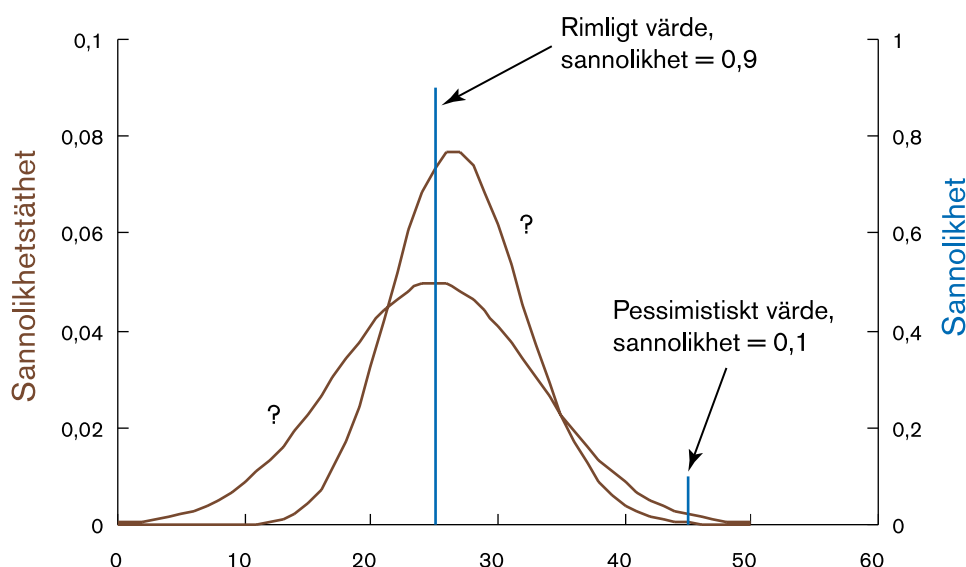
Alla indata till radionuklidtransportberäkningarna är behäftade med osäkerheter. Som tidigare beskrivits har osäkerheter kvantifierats genom att förutom rimliga värden, också bestämma pessimistiska värden för nästan alla indata. Figur 3-14 är en sammanställning av hur variationer i varje enskild parameter påverkar resultatet vid var och en av platserna. Oavsett vilken parameter som väljs pessimistiskt ligger den maximala dosen under dosgränsen.

Figuren visar förändringen (ökningen) i maximal dos om respektive parameter ändras från rimligt till pessimistiskt värde. Den maximala dosen avser tiden fram till en miljon år efter deponering.

Figuren visar att de största effekterna för Aberg fås för antalet initialt defekta kapslar, F-faktorn (produkten $t_w \cdot a_w$) och dosfaktorerna i biosfären (EDF-värdet). Många av de övriga parametrarna har liten inverkan på resultatet om de varierar utgående från det genomgående rimliga fallet. Effekterna av att variera F-faktorn orsakas framför allt av en försämrad retention av Ra-226.



Figur 3-14. Effekten av att variera olika parametrar utgående från det allt igenom rimliga fallet.



Figur 3-15. För indata där fördelningar saknas används rimliga och pessimistiska värden med sannolikheterna 0,9 respektive 0,1.

Riskanalyser

Det angivna kriteriet för förvarets säkerhet är ett riskmått, dvs en summering av produkter av sannolikheter och konsekvenser för olika möjligheter för förvarets utveckling.

Hittills redovisade beräkningar visar endast konsekvensen i form av dos för olika dataval till modellerna. För att kunna beräkna en risk måste också sannolikheten för olika datauppsättningar uppskattas.

Sannolikhetsfördelningar finns endast tillgängliga för en begränsad del av dataunderlaget såsom vissa flödesrelaterade data i geosfären. För den stora majoriteten data finns endast rimliga och pessimistiska värden, men ingen uppskattning av tillhörande sannolikheter.

De pessimistiska värdena är genomgående valda för att säkert utgöra en övre gräns för respektive parameters (negativa) inverkan på beräkningsresultatet. Många pessimistiska data måste därför betraktas som mycket osannolika. Även rimliga data är ofta försiktigt valda; i många fall kan ytterligare forskning, noggrannare mätningar etc, leda till att dessa data förskjuts i en positiv riktning.

Baserat på ovanstående ansätts sannolikheten 0,9 för rimliga data och sannolikheten 0,1 för pessimistiska data i de flertal fall där inga fördelningar finns att tillgå. Situationen illustreras i figur 3-15. I stället för att gissa utseendet hos en hel fördelning görs en grov uppskattning av sannolikheten för rimliga respektive pessimistiska data. (X-axelns gradering är godtycklig i denna illustration; rimliga och pessimistiska värden kan ibland skilja flera tiopotenser.)

En probabilistisk beräkning genomförs för de tre förvarsplatserna med data enligt följande:

- Framräknade korrelerade fördelningar används för advektiva gångtider och flöden på förvarsdjup.

- Endast pessimistiska värden används för karenstid, sprickgeometrier kring deponeringshål, Peclets tal samt maximalt diffusionsinträngningsdjup i bergmatrisen. Anledningen är teknisk och relaterad till begränsningar i nuvarande version av beräkningsprogrammen. För dessa parametrar är inverkan av skillnaden mellan pessimistiska och rimliga värden på beräkningsresultatet begränsad.
- För återstående data, d v s antal trasiga kapslar, lösligheter, IRF-värden, sorptionsdata i bentonit, sorptionsdata i återfyllning, diffusions- och sorptionsdata och flödesvätt yta i geosfären, samt EDF-värden i biosfären ansätts sannolikheterna 0,9 och 0,1 för rimliga respektive pessimistiska data.

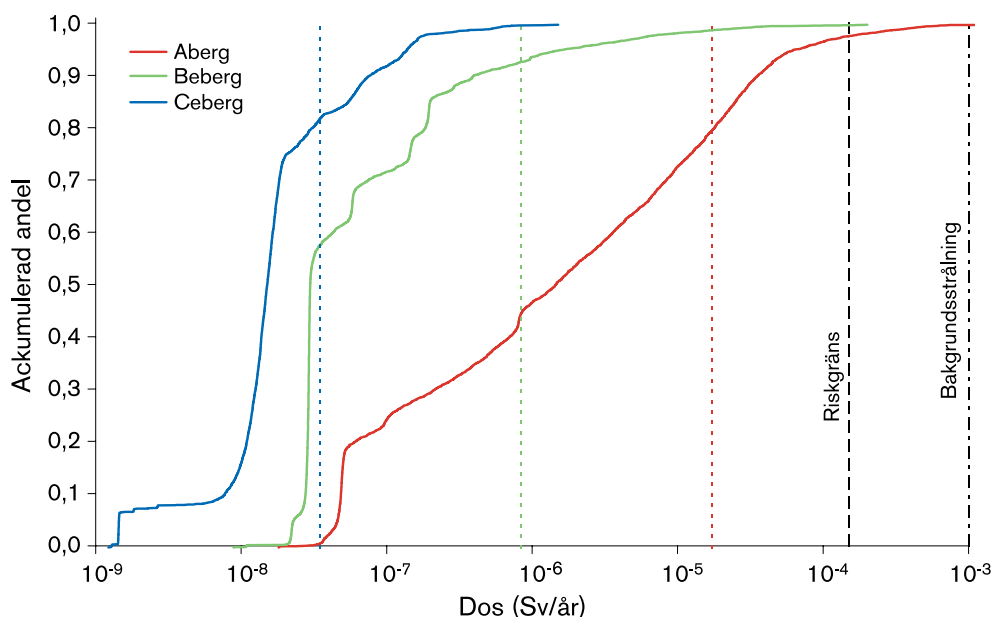
Flöden på förvarsdjup och advektiva gångtider är korrelerade enligt resultatet av de hydrologiska beräkningarna.

Resultaten i form av dosens fördelningsfunktion för de tre platserna framgår av figur 3-16 och figur 3-17. Figurerna skiljer sig åt genom att olika biofärsmoduler använts; en torvmosse i figur 3-16 och en platsspecifik brunn i figur 3-17.

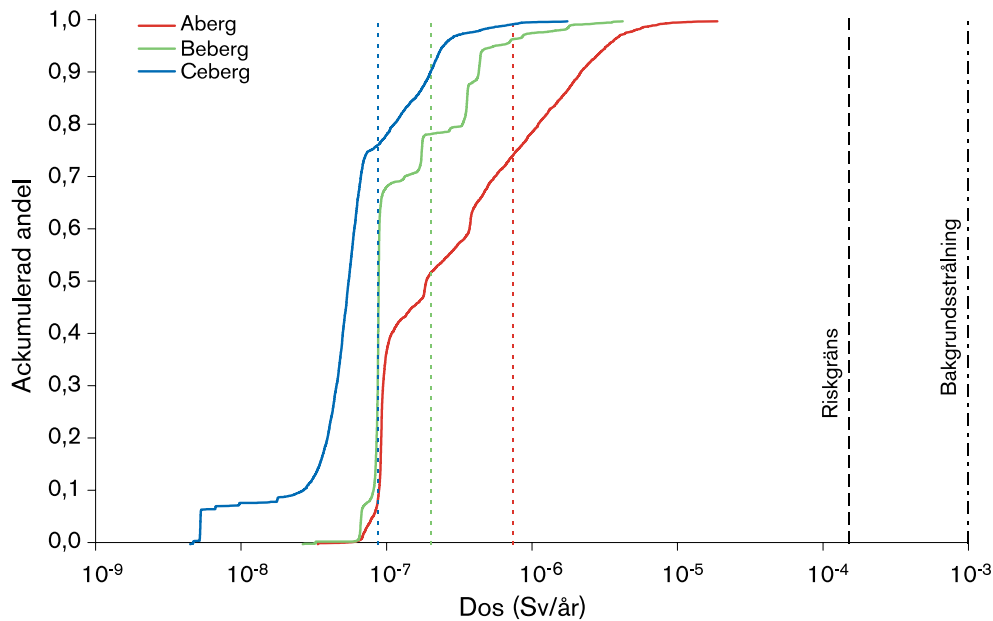
Det rimliga i att ansätta just de valda sannolikheterna kan bara bedömas genom att i varje enskilt fall studera tillvägagångssättet vid valet av rimliga och pessimistiska värden, vilket redovisas i Datarapporten.

För riskbedömningen är det intressanta resultatet fördelningarnas medelvärden. Medelvärdet är ett riskmått eftersom det utgör sammanvägningen av sannolikhet och konsekvens för samtliga realiseringar. Medelvärdena för de olika fördelningarna finns därför markerade i figurerna ovan.

Medelvärdena ska jämföras med riskgränsen i figurerna. Denna är tillämplig på de mest utsatta individerna i en regional grupp, vilket också gäller de använda EDF-värdena för brunn respektive torv. Medelvärdena för samtliga platser ligger väl under riskgränsen, både i brunns- och torvfallen. Det är också uppenbart att säkerhetsmarginalen skiljer mellan platserna; den är störst i Ceberg och minst i Aberg.



Figur 3-16. Probabilistiska resultat för platsspecifika torvmossar. De färgade lodräta linjerna visar respektive fördelnings medelvärde, dvs den beräknade risken vid de tre platserna.



Figur 3-17. Probabilistiska resultat för plats specifika brunnar. De färgade lodräta linjerna visar respektive fördelnings medelvärde, dvs den beräknade risken vid de tre platserna.

För brunnsfallet är det också värt att notera att **samtliga** realiseringar för alla platser ligger mer än 10 gånger under dosen som svarar mot riskgränsen i dessa beräkningar, dvs fördelningarna i figur 3-17 når aldrig nära riskgränsen.

Nästan alla realiseringar som ger signifikanta maxdoser i riskberäkningarna domineras antingen av I-129 eller, om geofärsretentionen är svag, av Ra-226. En stor kapselskada uppkommer efter 20 000 år (pessimistiskt värde i samtliga realiseringar). Maxdosen av I-129 kommer kort därefter.

Maxdosen av Ra-226 uppkommer dock aldrig förrän efter mer än 100 000 år och detta av fundamentala skäl: Ra-226 finns inte i bränslet initialt utan bildas genom kedjesönderfall av det initiala innehållet av U-238 och U-234. Sönderfallskedjans natur gör att bildningstakten för Ra-226 blir signifikant först efter omkring 100 000 år.

För att belysa betydelsen av Ra-226 kan resultatet av riskberäkningen också utvärderas med Ra-226 uteslutet. Resultaten framgår av tabell 3-1. Resultatet påverkas kraftigt för torvekosystemet vid Aberg och Beberg, i övriga fall mer marginellt.

Effekten hade blivit ungefär densamma om riskberäkningen gjorts för en period av 100 000 år i stället för en miljon år eftersom signifikanta doser från Ra-226 kommer efter ungefär 100 000 år och för övriga nuklider som dominerar dosbilden kort efter att kapselskadan blivit stor, dvs 20 000 år.

I sammanfattning är de tre platserna relativt likvärdiga de inledande 100 000 åren. Skillnaderna mellan platserna är cirka en faktor 10 och riskerna är alltid mindre än en procent av riskgränsen, för såväl brunn som torvekosystem. För tiden mellan 100 000 och en miljon år gäller samma slutsats för brunnsfallet. Med ett torvekosystem ökar risken vid Aberg och Beberg 10 resp 20 gånger, men ligger alltid väl under riskgränsen. En viktig anledning till att utslaget kommer för torvekosystemet är ackumulation av Ra-226 i torv, en process som ingår i biosfärsmodellen. För att sätta resultatet i perspektiv kan noteras att vissa torvmossor i Sverige uppvisar kraftigt förhöjda halter av Ra-226, som kommer naturligt från berggrunden.

Tabell 3-1. Relativa risker för torvekosystem och brunn med och utan Ra-226. Riskerna är uttryckta som andelar av acceptanskriteriet för mest exponerade individer, dvs 0,15 mSv/år.

| | Torvekosystem | | Brunn | |
|--------|---------------|-------------|------------|-------------|
| | med Ra-226 | utan Ra-226 | med Ra-226 | utan Ra-226 |
| Aberg | 0,11 | 0,003 | 0,005 | 0,001 |
| Beberg | 0,006 | 0,0006 | 0,001 | 0,001 |
| Ceberg | 0,0002 | 0,0002 | 0,0006 | 0,0006 |

Resultaten ska också ses i ljuset av att omfattande nedisningar är att förvänta i Sverige inom en hundratusenårsperiod, ämnet för klimatscenariot, kapitel 10. En nedisning leder till att i stort sett hela markskiktet eroderas. Aberg kan förväntas vara havstäckt en avsevärd del av den kommande hundratusenårsperioden. Dessa aspekter vägs ihop i den samlade resultatdiskussionen av hela analysen i rapportens slutkapitel.

Specialfall

För att belysa olika barriärers respektive roller i kapseldefektscenariot har ett antal specialfall beräknats:

- bränslet är fullständigt upplöst då en kontinuerlig vattenväg uppstår,
- inga löslighetsbegränsningar,
- stor initial kapselskada,
- buffertens diffusionsmotstånd försummas,
- geosfärens retention försummas.

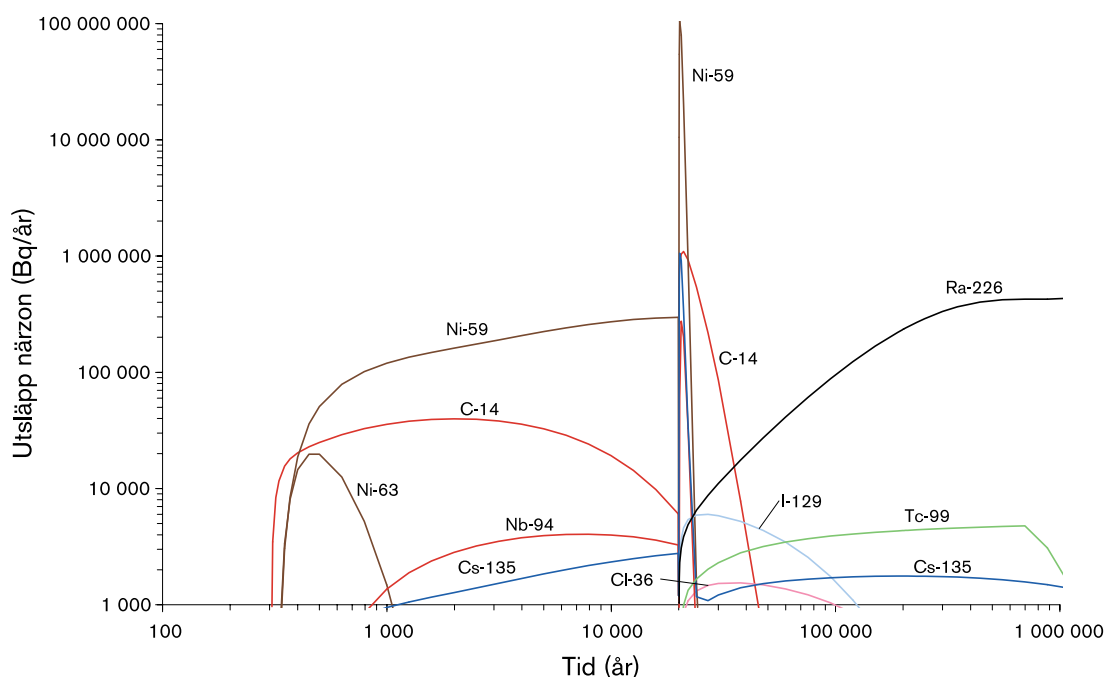
Inget av fallen har någon realism. De är medtagna för att illustrera funktionen hos barriärsystemet. De förändringar som gjorts i modellerna rör endast radionuklidtransporten. Systemets utveckling i övrigt, t ex de hydromekaniska konsekvenserna av en stor initial kapselskada är inte behandlade.

Utgångspunkten i samtliga beräkningsfall är rimliga data för Aberg. Inget av specialfallen ger konsekvenser som överstiger dosgränsen med undantag av fallet där löslighetsgränserna utesluts. Konsekvenserna av det fallet ligger över dosgränsen men under dosen från den naturliga bakgrundsstrålningen. Specialfallen demonstrerar att flerbarriärprincipen fungerar vad gäller radionuklidtransport. Inte ens extrema och helt orealistiska antaganden om en enskild barriärfunktion ger oacceptabla konsekvenser.

Analytiska beräkningar

För att verifiera resultaten från modellberäkningarna och för att demonstrera förståelse för transportmodellerna har en del av beräkningarna av radionuklidtransport i närzon och geosfär också genomförts med enkla analytiska modeller.

Figur 3-18 visar utsläpp från närzonen beräknade med en förenklad analytisk modell. Här används pessimistiska värden för data relaterade till kapselskador och till gränsskiktet mellan buffert och berg och i övrigt rimliga data för Aberg. Beräkningar av samma fall med den numeriska modellen COMP23 visar att de maximala utsläppen skiljer mindre än en faktor tre för alla nuklider i figuren.



Figur 3-18. Utsläpp från närområdet för pessimistiska värden för data relaterade till kapselskador och gränsskiktet mellan buffert och berg vid Aberg. Analytisk beräkning.

För geosfären används ett analytiskt uttryck för att beräkna hur stor andel av ett utsläpp av en radionuklid som passerar geosfären utan att sönderfalla. Genom att använda olika kombinationer av samma rimliga och pessimistiska data som i modellberäkningarna kan mycket av slutsatserna vad gäller radionuklidtransport i geosfären för de tre platserna återskapas.

3.3.9 Resultatdiskussion

Riskanalyser

Förvarn vid Aberg, Beberg och Ceberg uppfyller Strålskyddsinstitutets acceptanskrav för ett djupförvar för använt kärnbränsle.

Slutsatsen är baserad på beräkningar med den försiktiga uppskattningen att sannolikheten för att de pessimistiska värdena blir verklighet genomgående är 0,1. En uttömmande diskussion om sannolikheterna för rimliga respektive pessimistiska värden skulle föra mycket långt. I Datarapporten motiveras alla dataval utförligt och sannolikhetsbedömningar måste baseras på datavalen i de enskilda fallen. Valet av sannolikheten 0,1 för pessimistiska data är baserat på en översiktlig sådan utvärdering.

Om utsläppet sker till en brunn blir risken vid Aberg mindre än en hundradel av acceptanskriteriet om beräkningen görs för en tidsperiod av en miljon år. Risken vid Beberg är cirka fem gånger lägre och vid Ceberg omkring tio gånger lägre än den vid Aberg.

Vid utsläpp till torvekosystem skiljer sig platserna ungefär på samma sätt för tider upp till omkring 100 000 år. I ett miljonårsperspektiv ökar sedan risken vid Aberg med ungefär en faktor 40, vid Beberg en faktor 10 och vid Ceberg marginellt. För tider över 100 000 år dominerar den naturliga radionukliden Ra-226 konsekvenserna för torvekosystemet.

Den beräknade retentionsförmågan är likvärdig vid de tre platserna för långlivade icke sorberande nuklider. För sorberande nuklider är retentionen starkast vid Ceberg och svagast vid Aberg.

Riskberäkningarna avser den maximala dosen som uppkommer under 100 000 år alternativt en miljon år. Maxdosen uppkommer alltid vid tider efter 20 000 år. För tider upp till 20 000 år ger även en initialt defekt kapsel ett avsevärt skydd också med den mest pessimistiska bedömningen av utvecklingen.

Hur skiljer sig platserna åt?

Geosfären: Bergets retentionsförmåga har betydelse för förvarets fördröjande funktion vid en kapselskada. Förmågan är nuklidspecifik och avgörs av halveringstiden, nuklid-specifika kemiska faktorer och av bergets flödesegenskaper. De senare uttrycks av F-faktorn, dvs produkten av den advektiva gångtiden och den flödesvättan.

Från osäkerhetsdiskussionen kring den hydrauliska modelleringen är det också värt att rekapitulera bedömningen att beräknade skillnader i gångtider och flöden mellan platserna troligen till stor del är fysiskt baserade och kan härledas till platsspecifika hydrogeologiska förhållanden. Bergmassan i Aberg och Beberg är t ex cirka 100 gånger mer genomsläpplig än den i Ceberg med reservationen att även undersökningsmetodikerna skiljer sig åt mellan platserna.

I dos- och riskberäkningarna dominerar dock ofta icke sorberande nuklider, framför allt I-129, som alltid tränger genom berget, oavsett F-faktorns värde. Detta gör att effekten av skillnader i F-faktorer mellan platser till viss del utjämnas i en total riskbedömning.

Biosfären: Biosfärsförhållandena har stor inverkan på den beräknade dosen. Doserna blir flera tiopotenser lägre om utsläppet sker till vattendrag, sjöar eller havet, jämfört med om det sker till mark (torv, jordbruksmark, brunn). För Ra-226, som dominerar dosen i många ogynnsamma realiseringar, är dessutom EDF-värdet för torvmark mer än två tiopotenser högre än det för brunn.

Trots de stora skillnaderna i EDF-värden är det orimligt att ur säkerhetssynpunkt tillmäta dagens biosfärsförhållanden en stor betydelse vid platsdiskussioner. Biosfärstyperna torv, jordbruksmark och brunn finns eller kan sannolikt komma att finnas vid varje tänkbar djupförvarsplats. Biosfärens roll i analysen måste också ses i ljuset av den omfattande påverkan på biosfären som följer av förväntade klimatförändringar.

Osäkerhetsanalys

I osäkerhetsanalyserna studeras systematiskt effekten av att byta rimliga data mot pessimistiska. Man konstaterar först att för brunnsfallet överskrider inte dosen i någon enda realisering av riskberäkningen vid någon plats den dos som svarar mot riskgränsen. Detsamma gäller för torvmodulen vid Ceberg, medan dosen här överskrids i ett fåtal av de mest ogynnsamma realiseringarna vid Aberg och Beberg om Ra-226 inkluderas.

Detta är också en form av illustration av flerbarriärprincipen: En nedsatt funktion (pessimistiska värden) hos en barriär leder inte till en oacceptabel funktion hos systemet som helhet. Marginalerna är här störst för Ceberg och minst för Aberg.

Kapsel: De svårbedömda osäkerheterna i antalet skadade kapslar (rimligt värde 1, pessimistiskt 5) påverkar resultatet direkt. Det är inte uppenbart hur dessa osäkerheter kan nedbringas i framtiden.

Analysen av kapselns hydromekaniska utveckling efter en skada är omgärdad av stora osäkerheter. Fastän rimliga och pessimistiska uppskattningar kan göras redan idag av det fåtal faktorer som används i beräkningen av radionuklidtransport är det angeläget att förbättra förståelsen av den hydromekaniska utvecklingen.

Bränsle: En annan osäker faktor är bränsleupplösningen. Inverkan av osäkerheter i bränsleupplösningshastighet är begränsad för de allra flesta nuklider.

Även ett helt orealistiskt antagande om en omedelbar bränsleupplösning ger begränsade effekter med i övrigt rimliga data. De enskilda nuklidernas lösligheter begränsar utsläppet. Det viktigaste undantaget är Ra-226 och effekten blir märkbar först efter mer än 100 000 år.

Det är angeläget att skapa en bättre teoretisk och experimentell förståelse för bränsleupplösningprocessen.

Buffert: Effekterna av osäkerheter kring buffertens egenskaper vad gäller radionuklidtransport är små. Förutsatt att bufferten långsiktigt utvecklas som i basscenariot är förståelsen för buffertens roll för radionuklidtransporten god.

Återfyllning: Osäkerheter kring återfyllningsmaterialets påverkan på det totala utsläppet av radionuklider från närområdet är små. Slutsatsen måste prövas mot resultatet av mer detaljerade analyser av återfyllningsmaterialets långsiktiga utveckling och funktion i allmänhet. Behovet av sådana analyser påpekas i resultatdiskussionen för basscenariot.

Geosfären: De enkla osäkerhetsanalyserna visar att den naturliga variabiliteten i F-faktorn i geosfären ger de största effekterna på beräkningsresultatet (maxdos över 1 miljon år). Även osäkerheter i sorptions- och matrisdiffusionsegenskaperna spelar roll för retentionen, men är av mindre betydelse än flödesegenskaperna. Resultaten pekar på viktiga förhållanden i berggrunden att bestämma vid en platsundersökning.

Metoderna för bestämning av F-faktorn kan förbättras. Experiment och simuleringar med alternativa beskrivningar av berget kan förbättra möjligheterna att bedöma denna avgörande parameter. Sannolikt kan dessa arbeten visa att de nu föreslagna pessimistiska värdena är alltför låga.

Sprickstrukturen och de hydrauliska egenskaperna kring enskilda deponeringshål hanteras i SR 97 pessimistiskt. Bl a har en mindre spricka antagits skära varje deponeringshål mitt för skadan i kapselns kopparhölje. Inga deponeringshål har valts bort till följd av de hydrauliska beräkningarna. Vid en verklig förvarsplats med borrade deponeringshål skulle aktiva val baserade på observationer i deponeringshålet och beräkningar kunna förbättra resultatet av analysen. Genom aktiva val i en liten skala kan också storskaliga skillnader mellan olika platser utjämnas. Detta skulle kräva en metod för urval som visats fungera under realistiska fältförhållanden.

Biosfären: En viktig förbättring av underlaget till analysen bör kunna åstadkommas med en förbättrad biosfärmodellering. Slutsatsen är egentligen inte baserad på den faktor 10 som skiljer de rimliga värdena från de pessimistiska, sådana skillnader är troligen oundvikliga. Snarare är det bedömningen att redan de rimliga värdena troligen ofta är grovt överskattade som motiverar vidare arbete med biosfärmodellerna.

De högsta EDF-värdena för många radionuklider fås för torvmark och jordbruksmark, vilket inte är i överensstämmelse med tidigare säkerhetsanalyser där spridningsvägen via brunn har ansetts ge det dominerande dosbidraget. Torvens och jordbruksmarkens förmågor att ackumulera radionuklider är grunden till de höga EDF-värdena.

Modelleringen av EDF-värden i SR 97 är dock förenklad och sannolikt överdrivet pessimistisk. Det meningsfulla i att beräkna doskonsekvenser hundratusentals år in i framtiden kan också ifrågasättas. Alternativa säkerhetsindikatorer, som aktivitetsutsläpp, kan vara mer meningsfulla eftersom man genom dessa kan avgöra om förvaret kommer att innebära ett generellt miljöproblem eller inte.

Risikanalyser är genomförd med en metod som möjliggör probabilistiska beräkningar trots ett begränsat statistiskt underlag. Det är angeläget att metoden utvärderas inför kommande analyser.

Miljöskydd

Enligt Strålskyddsinstitutets föreskrifter ska även påverkan på ekosystemen kring förvaret redovisas. Inga specifika metoder för detta finns idag utvecklade.

I de allra flest beräkningsfallen i kapseldefekts scenariot ligger doserna många tiopotenser under bakgrundsstrålningen. Baserat på detta görs den generella bedömningen att ekosystemen vid Aberg, Beberg och Ceberg inte påverkas negativt av radionuklidspredningen i kapseldefekts scenariot.

3.4 Klimatscenario

I ett långt tidsperspektiv kan stora klimatförändringar förväntas i Sverige. Biologiska och geologiska observationer tyder på stora och cykliska klimatvariationer i det förgångna. Förloppen stämmer väl med variationer i jordens rörelsemönster i banan kring solen och de cykliska variationer i solinstrålning detta givit upphov till.

Variationer i jordbanans rörelser förväntas därför leda till framtida klimatvariationer som påminner om de historiska. Dagens klimat är i ett historiskt perspektiv varmt och framtida förändringar förväntas framför allt leda till kallare klimat med omfattande nedisningar, glaciationer, i ett hundratusenårigt perspektiv.

Klimatet förändras i långa tidsperspektiv kontinuerligt i både tid och rum. I en generell beskrivning av klimatutvecklingen kan man tala om tre huvudsakliga klimattillstånd:

- tempererat/borealt tillstånd,
- permafrosttillstånd,
- glacialt tillstånd.

Tempererat/borealt tillstånd

Detta är dagens klimat i större delen av Sverige. Klimatet är fuktigt vilket ger goda förhållanden för vegetation och fauna och därmed också för jordbruk och mänsklig bosättning.

Även under tempererade/boreala förhållanden är landet påverkat av tidigare nedisningar. Islasten trycker ned jordskorpan, under isfria perioder strävar den att återta sin ursprungliga form. Processen är långsam i relation till istillväxt och avsmältning, vilket medför att jordskorpan är i ständig rörelse. Detta är idag framför allt märkbart i kustområden där kustlinjen förskjuts då landet höjs/trycks ned.

Permafrosttillstånd

Vid detta klimat är marken permanent frusen åtminstone i partier, men inte istäckt. Idag förekommer permafrost på höga höjder i norra Sverige. Eftersom det kan ta tusentals år för permafrost att tina kan rester av permafrost från tidigare kallperioder finnas kvar under perioder med varmare klimat. Sådan permafrost förekommer i Ryssland och Kanada idag.

I områden med kontinuerlig permafrost är tundraecosystemet karakteristiskt. Växtligheten har anpassat sig till den mycket korta växtsäsongen och består av örter, snår och buskar.

Permafrosten förhindrar infiltration och grundvattenbildning. Den allra största delen av årsnederbörden stannar i markens ytskikt, och flödena i vattendragen varierar kraftigt över året. Under några få veckor på våren smälter snö och is, avrinning och flöden når sina maximum.

Förutsättningarna för jordbruk och mänsklig bosättning är betydligt sämre än vid ett tempererat klimat.

Glacialt tillstånd

Det glaciala tillståndet utmärks framför allt av att marken är istäckt över stora områden. Marken under istäcket är kraftigt eroderad på organiskt material. Kustlinjen är starkt förskjutet och områden i Sverige som idag är land kan vara havstäckta under det glaciala tillståndet. Grundvattenflöden och grundvattentryck kan vara betydligt förändrade jämfört med dagens förhållanden.

Vattnet som tränger ner i berggrunden vid det glaciala tillståndet förväntas vara syrerikt eftersom syre inte förbrukas av organiskt material i markskiktet. Grundvattnets salthalt varierar främst beroende på om marken är täckt av hav eller is. Isen ger också en betydande mekanisk belastning på berggrunden.

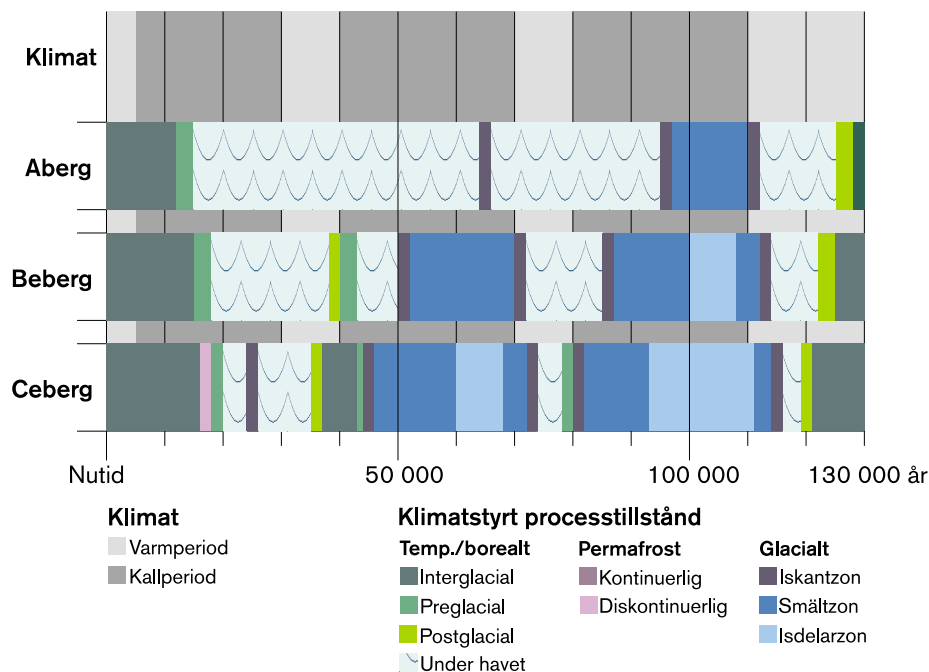
Under stora delar av det glaciala tillståndet är förutsättningarna för jordbruk och mänsklig bosättning obefintliga.

3.4.1 Klimatscenario i SR 97

I SR 97 skisseras en möjlig klimatutveckling för Aberg, Beberg och Ceberg för de kommande 150 000 åren. Förutsägelseerna grundas på modellsimuleringar av den globala klimatutvecklingen utifrån förväntade variationer i solinstrålning. Den globala utvecklingen och simuleringar av kustlinjeförskjutning och isdynamik ger tillsammans med geologiska evidens en bild av den regionala utvecklingen i Skandinavien. Baserat på denna kan den platsspecifika utvecklingen för Aberg, Beberg och Ceberg uppskattas. Utvecklingen beskrivs som en serie av klimattillstånd som successivt avlöser varandra, se figur 3-19.

Ur klimatbeskrivningarna uppskattas platsspecifika termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska förhållanden i berggrunden vid de tre platserna.

Genom att jämföra dessa förhållanden med de som förekommer i basscenariot uppskattas THMC-utvecklingen för förvaret i form av en jämförelse med basscenariot.



Figur 3-19. Utvecklingen vid Aberg, Beberg och Ceberg som tidsserier av klimattillstånd, samt tiden då platserna ligger under havets yta.

3.4.2 Påverkan på förvaret

I relation till basscenariot medför övergångarna mellan kallare klimat, med permafrost och istillväxt, och varmare klimat, med förhållanden liknande dagens, att:

- Förhållandena i biosfären ändras radikalt.
- Temperaturen i berget påverkas.
- Förutsättningarna för grundvattenflöde förändras – under olika perioder kan grundvattenflödet både minska och öka.
- Lastförhållandena i berget förändras vid en glaciation.
- Förändrad grundvattensammansättning – framför allt kommer vattnets salthalt att variera.

De mest påtagliga förändringarna relaterade till klimatet sker i biosfären. Under en glacial/interglacial cykel förändras biosfären radikalt i flera sammanhang, t ex då land omvandlas till havsbotten och vice versa, eller då en inlandsis täcker ett område.

3.4.3 Termisk utveckling

Ett kallare klimat ger en sänkning av temperaturen i berget, men permafrosten förväntas aldrig nå förvarsdjup. Påverkan på temperaturen i kapsel, buffert och återfyllning blir därför måttlig. I partier av geosfären där grundvattnet fryser påverkas framför allt grundvattenströmningen.

3.4.4 Hydraulisk utveckling

Under en klimatcykel förändras grundvattenflödena, de kan både öka och minska relativt dagens flöden. Vid de tre platserna förväntas grundvattenflödena att vara mindre än eller jämförbara med dagens under den största delen av den kommande cykeln. Förutom av att grundvattnet fryser vid permafrost påverkas utvecklingen kraftigt av de förändrade hydrauliska randförhållandena till följd av ändrad nederbörd, kustlinjeförskjutning och istillväxt i omgivningen. Grundvattentrycket kan öka väsentligt under en inlandsis, även infiltrationsmönstret förändras. Om en plats blir havstäckt utjämnas tryckskillnaderna i geosfären och de hydrauliska förhållandena kan bli i det närmaste stagnanta.

3.4.5 Mekanisk utveckling

Mekaniskt ändras randförhållandena radikalt av tyngden från en inlandsis. Såväl den statiska lasten från istäcket som de dynamiska förloppen då is växer till och smälter ger mekaniska återverkningar i förvarsberget. Belastningssituationen är komplex; såväl istjocklek, vattentryck, nedtryckning av jordskorpan, storskaliga tektoniska rörelser som bergmassans och sprickornas egenskaper påverkar spänningstillståndet. Samspelet mellan den mekaniska lasten och det höga grundvattentrycket kan leda till att sprickor både vidgas, s k hydraulisk spjälkning, och sluts och därmed påverkas grundvattenflödet, dvs man får en återkoppling till den hydrauliska utvecklingen. Definitionsmässigt behandlas jordskalv inducerade av islaster inte här utan i jordskalvsscenarioet.

Sprickbildning och/eller propagering av befintliga sprickor kan förekomma om spänningarna och spänningsanisotropin som genereras av islasten är tillräckligt stora. Ökade huvudspänningsskillnader kan leda till skjuvbrott i bergmassan. I de analyser som hittills gjorts har emellertid spänningstillskottet från islasten endast medfört ökad spänningsanisotropi i tunnlarnas och deponeringshålens närhet.

Glaciationer bedöms därför inte kunna leda till nybildning av stora sprickor som skär deponeringshål eller till att befintliga mindre sprickor propagerar och sammansmälter så att sådan sprickor bildas.

Det maximala hydrostatiska trycket på förvarsdjup uppskattas i klimatscenarioet till cirka 32 MPa. Med svälltrycket adderat skulle det isostatiska trycket mot kapseln därmed närma sig 40 MPa. Kapselinsatsen i BWR-utförningen har beräknats klara ett yttre jämnt fördelat tryck på 80 MPa, medan den i PWR-utförningen motstår 110 MPa, se avsnitt 3.2.6. Det innebär att kapseln bör klara de tryckökningar som kan uppstå under en glaciation.

Beräkningarna av kapselns hållfasthet behöver förfinas med mer realistiska, inhomogena materialegenskaper enligt avsnitt 3.2.6.

3.4.6 Kemisk utveckling

Kemiskt förändras randförhållandena jämfört med basscenarioet genom att syrerikt vatten tränger ner i berggrunden utan att syret förbrukas i ett organiskt markskikt, eftersom detta förväntas vara utplånat under stora delar av en glacial cykel. Syret förbrukas i stället i huvudsak genom reaktioner med geosfärens mineral.

Slutsatsen av studier av transporten av syrerikt glacialt smältvatten genom berggrunden är att berget har kapacitet att förbruka syret innan det når förvarsnivå. Där gradienterna för grundvattenflödena tillfälligt är som högst och den vattenledande förmågan stor, skulle dock syresatt vatten kunna föras ned till stora djup. Det betyder att om syresatt vatten

skulle existera på förvarsdjup är förekomsten begränsad, både i tid och rum. Om syresatt vatten mot förmodan skulle nå ett deponeringshål, har bentonitbufferten hög kapacitet att förbruka syre, och syresatt vatten bör därför aldrig nå kapseln.

Klimatförändringarna ger även förändringar i grundvattnets salthalt. Dels förekommer saltutfrysning då permafrost bildas. Processen innebär att salt drivs ut ur frysande vatten så att det ofrusna vattnet får en högre salthalt. Dels ger de förändrade flödesförhållandena i geosfären nya förutsättningar för transport och blandning av vatten från olika partier av geosfären och infiltrerande ytvatten. Resultatet kan bli både högre och lägre salthalter än i basscenariot.

Under det tempererade/boreala tillståndet ligger de förväntade salthaltsvariationerna inom de variationer mellan sött och salt vatten som idag återfinns på de tre förvarsplatserna. Då isfronten passerar kan höga salthalter förekomma på förvarsdjup. En högre salthalt ger ett snabbare jonbytesförlopp och därmed en snabbare sänkning av svälltrycket till 4–5 MPa som nås efter fullbordat jonbyte från Na^+ till Ca^{2+} , se basscenariot. Inte ens om de höga salthalter som kortvarigt kan tänkas förekomma då en isfront passerar vore permanenta, äventyras buffertens funktion enligt redovisningen i basscenariot.

De låga salthalter som temporärt kan förekomma på förvarsdjup då en plats ligger nära isranden ligger något under intervallen som redovisas i basscenariot. En lägre salthalt ger ett långsammare jonbyte. Den uppskattade halten av tvåvärda positiva joner är tillräcklig för att förhindra buffererosion, men marginalen är liten.

De förväntade förändringarna i grundvattensammansättning under en glacial cykel bedöms i sammanfattning inte hota de tekniska barriärernas integritet.

Liksom i basscenariot dras slutsatsen att de långsiktiga effekterna av erosion under extrema förhållanden eventuellt kan behöva utredas ytterligare. Återfyllningens kemiska utveckling och funktion i klimatscenariot återstår att redovisa.

3.4.7 Radionuklidtransport

Radionuklidtransport förekommer endast om det finns otäta kapslar i förvaret. Förändringarna under en glaciation förväntas inte leda till att kapslar skadas så att otätheter uppstår. Under en glaciation förändras förutsättningarna för grundvattenflöden och därmed även grundvattensammansättningen. Förändringarna påverkar transporten av radionuklider från förvaret och genom berget, om det finns initialt otäta kapslar. Förhållandena i biosfären förändras radikalt under en glacial/interglacial cykel. Det påverkar i hög grad de doser människan kan komma att utsättas för.

Under perioder med höga grundvattenflöden ökar den möjliga uttransporten av radionuklider från ett förvar med otäta kapslar. Ökade grundvattenflöden kan förväntas i kustlägen vid landhöjning och framför allt under vissa faser av en glaciation. Då grundvattenflödena är som störst är även vattenomsättningen vid ytan stor. Det betyder att utspädningen av radionuklider i biosfären förväntas öka. Sammantaget medför det att doserna minskar relativt dagens förhållanden.

En relativ ökning av doserna förväntas endast vid Aberg då den relativa kustlinjen sjunker jämfört med nuvarande nivå så att havstäckta områden förvandlas till land. Det inträffar bara under interglacialer vid övergången mot ett kallare klimat, och således i storleksordningen vart hundra tusende år. De ökade doserna beror framför allt på förändringar i biosfären. Betydelsen av denna förändring utreds i kapseldefektscenariot, där effekterna av landhöjning vid Aberg är inkluderade redan i det rimliga fallet.

3.4.8 Sammanfattning

Klimatscenariot beskriver en tänkt utveckling under den kommande glaciala/interglaciala cykeln. Det baserar sig dels på modelleringar av utvecklingen under denna period, dels på det utvecklingsmönster som karakteriserat de senaste 400 000 till 900 000 åren. Den uppmålade utvecklingen kan därför ses både som ett scenario för de kommande 130 000 åren, och en generell beskrivning av utvecklingen under en godtycklig glacial/interglacial cykel.

De mest påtagliga förändringarna relaterade till klimatet sker i biosfären. Under en glacial/interglacial cykel förändras biosfären radikalt i flera sammanhang, t ex då land omvandlas till havsbotten och vice versa, eller då en inlandsis täcker ett område. Lasten från en inlandsis påverkar den mekaniska utvecklingen. Sammansättningen på det vatten som förs ned i berget, randvillkoren för grundvattenflödet genom berget, och därmed grundvattensammansättningen kommer att förändras under en glacial/interglacial cykel. De förändringar som förväntas bedöms inte äventyra de tekniska barriärernas integritet. Klimatrelaterade förändringar bedöms t ex inte kunna leda till att kapslar påverkas så att otätheter uppstår.

3.4.9 Osäkerheter

Det är mycket sannolikt att klimatet i framtiden kommer att bli kallare och att Skandinavien någon gång kommer att täckas av is. Det är troligt att en sådan situation kommer att inträffa någon gång under de närmaste 100 000 åren. Kunskapen om jordens klimatsystem är dock inte tillräcklig för att göra några exakta uttalanden om isutbredningen under den kommande glaciala/interglaciala cykeln.

Klimatscenariot i SR 97 beskriver en utveckling som liknar den vi känner från den senaste glaciala perioden. Scenariot innehåller tre kallperioder och tre varmperioder. Under den sista kallperioden antas en isutbredning som motsvarar den största man känner från geologiska data. Under den sista varmperioden antas interglaciala förhållanden. Avsikten är att täcka in förändringar med betydelse för förvarets utveckling på ett sådant sätt att deras konsekvenser inte underskattas.

Tilltron till att möjliga förändringar täcks in är därför god även om beskrivningarna av detaljer i utvecklingen är behäftade med stora osäkerheter.

Vad gäller förvarssystemets utveckling under de förändrade förhållandena finns osäkerheter kring:

- kapselns hållfasthet, där beräkningar behöver förfinas med användning av mer realistiska materialegenskaper,
- buffererosion vid extremt jonfattiga grundvattensammansättningar,
- återfyllningens utveckling och funktion vid klimatförändringar.

3.5 Jordskalvsscenario

3.5.1 Bakgrund

I jordskalvsscenario utreds hur jordskalv kan påverka förvarets säkerhet. I centrum för analysen står frågan om jordskalv kan leda till att isoleringen bryts hos någon eller några kapslar. Förutsättningarna för scenariot är desamma som för basscenariot med undantag av att även jordskalv tänks förekomma i omgivningen. I övrigt gäller i likhet med basscenariot att förvaret är byggt enligt specifikationer och dagens förhållanden i omgivningen tänks fortgå.

De nuvarande tektoniska förhållandena i den Baltiska skölden som Sverige vilar på, kan bedömas ha varit konstanta under de senaste två miljoner åren, medan spänningstillståndet i sina huvuddrag kan ha bestått under de senaste 25 miljoner åren.

Skölden har också utsatts för cykliska belastningar på grund av glaciationer och kommer sannolikt att utsättas för nya sådana belastningar. Tidsskalan för en glaciationscykel, cirka 100 000 år, är kort jämfört med det tektoniska tidsperspektivet och man kan anta att spänningstillståndet i stort sett återställs mellan nedisningarna. Det finns dock oklarheter ifråga om vilket spänningstillstånd som kommer att gälla under istäcket och vid istäckets rand, och vilken tidsskala som gäller för spänningsfältets återhämtning.

De storskaliga rörelser som äger rum i skölden bestämmer randvillkoren för den långsiktiga mekaniska utvecklingen i förvarsberget.

Jordskalv

Det svenska berggrunden är av gammalt ursprung och visar, liksom andra sköldområden, en låg seismisk aktivitet i förhållande till tektoniskt aktiva områden. I den svenska delen av skölden förekommer skalv främst i sydväst i Vänerområdet samt längs Norrlandskusten. Skalvens magnitud har bara vid enstaka tillfällen varit större än 4,0. Skalv som uppträder i anslutning till något av jordens tektoniskt aktiva områden, t ex Japan, Kaukasus eller Kalifornien kan vara av magnitud cirka 8, vilket innebär att nästan en miljon gånger mer energi frigörs än vid ett skalv av magnitud 4.

Ett jordskalv innebär att töjningsenergi som ackumulerats under ett långsamt deformationsförlopp plötsligt frigörs i allmänhet genom skjuvrörelser längs en större eller mindre sprickzon. Urberget i Sverige har deformerats i många skeden och har väl utvecklade system av sprickor och sprickzoner. Framtida jordskalv kommer därför med all sannolikhet att utlösas i befintliga sprickzoner. Skalv av stor magnitud kan då förväntas ske i stora zoner, eftersom dessa utgör de svagaste länkarna i berggrunden, och eftersom deras stora utsträckning i planet möjliggör stora rörelser. Statistik från jordskalv över hela jorden visar ett klart samband mellan skalvens magnitud och utsträckningen hos de zoner i vilka skalven inträffar.

Två olika uppfattningar finns om vilken typ av storskalig deformation som är den huvudsakliga orsaken till den nuvarande seismiska aktiviteten i Skandinavien:

1. Deformationer som beror på platttektoniska rörelser.
2. Deformationer som beror på den differentiella landhöjning som fortfarande pågår efter den senaste istiden.

Under den senaste istidens avsmältning förekom jordskalv med betydligt större magnituder än vad vi känner till från historisk tid. Jordskalv med en magnitud av cirka 8 förekom då i norra Sverige. Möjligen förekom liknande skalv även i andra delar av Sverige under denna tid. Orsaken till dessa stora skalv är inte fastställd men den starka kopplingen till en begränsad tidsperiod vid inlandsisens avsmältning gör att ett snabbt differentielt landhöjningsförlopp eller inlåsta tektoniska spänningar under den långa istäckta perioden nämns som möjliga orsaker.

Kapseln

Baserat på modellberäkningar för kapseln som redovisas i avsnitt 3.2.6 används i den följande jordskalvsanalysen pessimistiskt kriteriet att bergrörelser av storleken 0,1 meter och däröver kring ett deponeringshål kan leda till kapselskador.

3.5.2 Analys av jordskalvsrisker

Den seismiska aktivitet som nu finns i den svenska berggrunden visar att en del av den töjningsenergi som kontinuerligt tillförs eller som har tillförts under någon tidigare epok frigörs genom jordskalv. De risker för förvarets säkerhet som kan uppstå på grund av att mekaniska verkningar av skalv propagerar in i förvarsområdet måste därför analyseras och värderas.

För att uppskatta det antal kapslar som kan skadas på grund av skalv inom de närmaste 100 000 åren vid de tre förvarsplatserna måste man kunna beräkna eller uppskatta vid hur många deponeringshål som enstaka eller ackumulerade förskjutningar längs sprickor kan komma att överstiga 0,1 m under tidsperioden. Sådana beräkningar har gjorts för de tre platserna Aberg, Beberg och Ceberg. Analysen omfattar:

- A. Simulering av den mekaniska effekten på bergmassan av enstaka skalv av olika magnitud och på olika avstånd från förvaret.
- B. Prediktion av hur frekvensen av skalv av olika magnitud varierar i tid och rum under de närmaste 100 000 åren.
- C. Platsspecifika simuleringar av enstaka skalv enligt den magnitud/frekvens statistik som gäller i respektive område med platsspecifika förekomster av sprickor och sprickzoner.

A. Effekt av enskilda skalv

De viktigaste parametrarna som styr en sekundär sprickrörelse, t ex vid ett deponeringshål, är skalvets magnitud, avståndet från den sprickzon där skalvet sker till sprickan som skär deponeringshålet, samt sprickans storlek, dvs utbredning i dess eget plan. Generiska exempel visar att sprickrörelser av 0,1 m kan uppnås om ett skalv av magnitud 7,5 inträffar inom ett avstånd av 100 m från förvaret. På motsvarande sätt kan sprickrörelser av 0,1 m uppnås om ett skalv av magnitud 8,2 inträffar inom ett avstånd av cirka 1 km från förvaret. Exempelen är beräknade med samma pessimistiska antaganden om bergets egenskaper som diskuteras i avsnitt 3.5.3 nedan. Framför allt försummas friktion i sprickorna.

B. Prediktion av jordskalvsfrekvens

Ansatsen är att använda befintlig jordskalvsstatistik och extrapolera denna till att gälla 100 000 år framåt. I statistiken över magnitud och frekvens för svenska skalv finns bara skalv med magnituder mindre än 5. Den befintliga statistiken extrapoleras till att gälla för

skalv med magnituder upp till och med 8,5. Statistiken är inte tillräckligt omfattande för att dra några säkra slutsatser om skillnader mellan de tre förvarsplatserna.

C. Platsspecifika simuleringar av jordskalv

Simuleringarna görs i fyra steg:

1. Sprickdata från de tre förvarsplatserna analyseras och används för att upprätta spricknätverksmodeller. Spricknätverksmodellerna har en deterministisk del och en stokastisk del.
2. För varje förvarsplats datorgenereras 100 realiseringar av den stokastiska spricknätverksmodellen.
3. För varje förvarsplats slumpas jordskalv ut på zoner belägna inom 100 km avstånd från förvarsplatsen i enlighet med den jordskalvsstatistik som antas gälla i området. Regressionssamband från jordbävningsstatistik används för att avgöra vilken minsta utsträckning i markytan som erfordras för att hysa skalvet. Ett enskilt skalv representeras som en momentan förskjutning.
4. Skalvens effekt på ett statistiskt representativt urval av kapselskärande sprickor analyseras genom datorsimulering.

Resultat

Resultaten av analysen uttrycks som den procentandel deponeringshål som utsätts för sprickrörelser större än 0,1 m under 100 000 år. Resultaten är likvärdiga för de tre platserna och medelvärdena för antalet skadade kapslar är bråkdelar av en procent.

Kapselbrottsfördelningarna är starkt asymmetriska. Medianvärdena för samtliga platser är noll kapselbrott. I cirka 90 procent av simuleringarna sker inga kapselbrott alls för de flesta kombinationer av platser och jordskalvsstatistik. I övriga 10 procent är det oftast enskilda skalv som orsakar brotten; de kumulativa effekterna är således små.

3.5.3 Osäkerheter

Analysen omgärdas av många osäkerheter, både sådana som hanteras pessimistiskt och andra.

Viktiga osäkerheter som hanteras pessimistiskt:

- **Sprickornas mekaniska egenskaper.** Sprickorna antas vara utan friktion och kohesion. Detta är mycket pessimistiskt; om sprickorna hade haft en hållfasthet hade alla sekundära förskjutningar blivit mindre. En friktionsvinkel av 30 grader hade reducerat förskjutningsbeloppen med uppskattningsvis en faktor 5. Detta skulle leda till att inga kapselskador alls skulle uppstå.
- **Bergmassans mekaniska egenskaper.** Sprickornas sekundärförskjutningar påverkas i de gjorda simuleringarna inte av andra sprickor eller av förvarets hålrum. Berget antas uppföra sig linjärelastiskt. Också detta är pessimistiskt.
- **Kapselpositioner.** En osäkerhet finns om hur väl man i verkligheten kommer att lyckas undvika att deponera i deponeringshål som genomskärs av stora sprickor. I den nu gjorda analysen har inga effekter tillgodoräknats av att kapselpositioner kommer att kunna förkastas.

- **Kriteriet för kapselskada.** Kriteriet är pessimistiskt och baseras på en klenare kapselutformning som gav en måttlig plastisk töjning i kopparkapseln vid denna deformation. Relevansen hos kriteriet bör prövas genom nya beräkningar med nuvarande kapseldesign.

Den viktigaste osäkerheten som inte hanteras pessimistiskt gäller **extrapolationen av jordskalvsstatistiken**. Befintlig statistik omfattar endast ett begränsat tidsintervall och inga skalv av större magnitud än 5. Dessutom finns inte något entydigt svar på frågan om orsakerna till tidigare och pågående seismiska aktiviteter eller den möjliga omfattningen och varaktigheten av framtida glaciationer.

3.5.4 Slutsatser

Analysmetodiken är resultatet av ett första steg i utvecklingen av ett tillvägagångssätt för kvantitativ analys av jordskalvsscenarioer.

Redan dagens pessimistiska analyser visar att sannolikheten för kapselskador under en period av 100 000 år är av samma storleksordning som den som antagits för initiala kapselskador, dvs bråkdelar av en procent.

De pessimistiska antaganden som görs i riskanalysen bedöms med god marginal kunna kompensera för bl a de osäkerheter som har att göra med prediktionen av framtida jordskalv. Redan genom att göra mera realistiska antaganden om sprickornas mekaniska egenskaper får man t ex en så kraftig reduktion av rörelserna att inga kapselskador förväntas, förutsatt att förvaret inte läggs på mindre avstånd än 100 meter från zoner med utsträckning av mer än 100 km. Sådana zoner kan med stor säkerhet undvikas vid inplaceringen av ett framtida förvar vilket gör att risken för kapselskador orsakade av jordskalv framstår som försumbar.

Till detta kommer effekten av övriga pessimistiska antaganden och pessimistiskt hanterade osäkerheter, där förmodligen framför allt antagandet om att bergmassan är ett linjärelastiskt medium utan dämpande egenskaper ger stora marginaler.

Mot denna bakgrund förväntas jordskalv inte leda till kapselskador. Därför görs inga beräkningar av radionuklidtransport i jordskalvsscenarioet i SR 97. Metodiken för jordskalvsanalyser vidareutvecklas för kommande säkerhetsanalyser.

3.6 Intrångsscenario

Koncentration och isolering av det använda kärnbränslet på en plats innebär att denna plats innehåller mer farligt material än andra platser med likartade naturliga förhållanden. För platsens framtida användning medför detta oundvikligen att vissa restriktioner drabbar även framtida människor. Detta är inget unikt i samhället. Det finns många exempel – städer, gruvor, hamnar, vattentäkter, soptippar, åkrar, bergtunnlar osv – som har kortare eller längre inverkan på möjlig/tillåten/lämplig användning av den ursprungliga naturliga platsen. Restriktionerna på en djupförvarsplats bör vara minimala med tanke på det långa tidsperspektivet. I princip ska platsen kunna användas till ”vad som helst”.

Principen att samla farligt avfall på en plats medför en risk för att människor kan komma att exponeras för en stor mängd av avfallet. Om framtida generationer glömmet förvaret och dess syfte kan de oavsiktligt komma att påverka det. I värsta fall leder den mänskliga påverkan till att isoleringen av avfallet bryts.

Mänsklig påverkan har beaktats vid utformningen av förvaret och vid platsvalet. Förvarsdjupet ska tillåta mänsklig aktivitet på och i mark nära jordytan vid förvaret, och även byggande av många av de slag av berganläggningar som finns idag. Platsen är fri från vad som idag betraktas som naturresurser.

På grund av osäkerheter om människans och samhällets utveckling går det dock varken att garantera att mänsklig påverkan på förvaret inte kommer att ske, eller att beskriva hur den kan komma att gå till. Stora bergarbeten nära förvaret kan i kombination med naturliga processer komma att påverka de tekniska barriärernas funktion. Vid genomborring av en kapsel bryts isoleringen direkt.

Som en illustration har konsekvenserna av en ofrivillig genomborring av en kapsel utretts. Dos och risk för borrhälspersonalen, samt för en familj som bosätter sig på platsen i ett senare skede har utretts. Borrhälspersonalen utsätts för de högsta doserna. Genomförs borrhälsborringen inom cirka 300 år efter det att förvaret förslutits kan dosen till borrhälspersonalen väsentligt överskrida bakgrundsstrålningen och nå de nivåer som idag tillåts för personer i radiologiskt arbete. Eftersom sannolikheten att borra igenom en kapsel är låg – den uppskattas till 10^{-7} – blir den risk framtidens borrhälspersonal kan utsättas för på grund av att djupförvaret byggts ändå mycket liten även om förvaret faller i glömska. Dosen till familjen blir lägre än till borrhälspersonalen, den överskrider aldrig den naturliga bakgrundsstrålningen. Om man antar att det finns ett övergivet borrhål genom en kapsel på platsen då en familj flyttar dit, kan dosen till familjen överskrida acceptanskriteriet $1,5 \cdot 10^{-5}$ Sv per år upp till 400 år efter det förvaret förslutits. Baserat på den uppskattade sannolikheten att borra igenom en kapsel behövs det minst 25 000 borrhål per år till 500 meters djup för att risken ska uppgå till 10^{-6} per år.

Genomgången av mänskliga aktiviteter som kan påverka förvarets funktion visar att borring av djupa hål, samt byggande av större berganläggningar inte är lämpligt. Det är möjligt att restriktionerna mot sådant användande av platsen en gång glöms bort eller överträds. Frågan blir då vilka konsekvenser som kan tillåtas. I det analyserade scenariot uppträder bergundersökarna oförsiktigt – mer oförsiktigt än vad man kan förvänta sig av dagens människor med tillgång till dagens teknik. De har dock ett visst ansvar för sina handlingar.

I ett långt tidsperspektiv kan förvarsplatsen komma att utnyttjas på ett sådant sätt att förvaret påverkas. Möjligheterna att bedöma de radiologiska konsekvenserna av detta är begränsade på grund av osäkerheter förknippade med människans och samhällets utveckling. I det analyserade scenariot exponeras de mest utsatta personerna för en stråldos motsvarande cirka 0,1-10 gånger den naturliga bakgrundsstrålningen. Sannolikheten för att exponering kommer att ske bedöms vara mycket liten varför risken för individer (såväl borrhälspersonal som de vilka eventuellt bosätter sig på platsen efter en borring) är väsentligt mindre än 10^{-6} per år.

4 Diskussion och slutsatser

Syftet med SR 97 formulerades i inledningen som fyra punkter:

1. SR 97 ska ge underlag för att påvisa möjligheten att finna en plats i svensk berggrund där KBS 3-metoden för djupförvaring av använt kärnbränsle uppfyller de krav på långsiktig säkerhet och strålskydd som anges i SSI:s och SKI:s föreskrifter.
2. SR 97 ska demonstrera metodik för säkerhetsanalys.
3. SR 97 ska ge underlag för att precisera de faktorer som ligger till grund för val av områden för platsundersökningar och för att härleda vilka parametrar som behöver bestämmas och vilka övriga krav som bör ställas på en platsundersökning.
4. SR 97 ska ge underlag för att härleda preliminära funktionskrav på kapseln och de övriga barriärerna.

I detta kapitel diskuteras var och en av punkterna följt av en redovisning av hur erfarenheterna från SR 97 kan användas till att bli prioritera forskningsinsatser. Kapitlet avslutas med några korta ord som sätter SR 97 i dess sammanhang inom SKB:s lokaliseringsprogram.

4.1 KBS-3-metodens säkerhet i svensk berggrund

Säkerhetsanalysen utgår från förvarssystemets utseende efter förslutning och analyserar hur förvaret kan förändras över tiden. Tre fiktiva förvar baserade på data från tre verkliga platser analyseras för att belysa olika förhållanden i svensk granitisk berggrund. Långsiktiga förändringar analyseras genom en uppdelning i inre processer i förvarssystemet och yttre påverkan från omgivningen. Olika förhållanden initialt och i omgivningen ger en uppsättning scenarier för vilka förvarets utveckling analyseras kvantitativt. En bedömning av analysens resultat rymmer såväl kvalitativa som kvantitativa frågor:

- Är alla inre processer och yttre skeenden av vikt identifierade?
- Vilka är resultaten av de olika scenarioanalyserna och vilken tilltro kan resultaten tillmätas?
- Hur bör resultaten av scenarioanalyserna vägas samman till en total riskbedömning?
- Hur påverkar olika förhållanden i svensk berggrund möjligheterna att bygga ett säkert djupförvar?

De tre första frågorna följer ur metodiken för säkerhetsanalysen, den sista rör ett specifikt syfte med SR 97.

4.1.1 Är alla inre processer och yttre skeenden av vikt identifierade?

Identifiering av inre processer och yttre skeenden av vikt för förvarets långsiktiga utveckling och säkerhet har pågått i flera decennier, i Sverige och i andra länder. Arbetet finns dokumenterat i rader av rapporter och databaser. SKB har en egen databas som ständigt underhålls och kompletteras med bl a internationella erfarenheter. Det senaste decenniet har mycket få nya processer av vikt identifierats. Förvarets uppbyggnad med flera barriärer med delvis redundanta funktioner gör också att känsligheten minskar för en eventuell oidentifierad process.

Scenarievalet i SR 97 är en expertbedömning, grundad på erfarenheter från tidigare analyser, tillgängliga databaser etc. En jämförelse med säkerhetsanalyser i andra länder visar att den uppsättning scenarier som analyseras i SR 97 stämmer väl med andra analyser.

Tilltron till att allt viktigt finns med måste bedömas utifrån de ansträngningar som gjorts för att nå fullständighet och utifrån expertkunskap om förvarssystemet och omgivningens natur.

SKB bedömer att de inre processer och den uppsättning scenarier som analyseras i SR 97 är tillräckliga för att ge god tilltro till säkerhetsanalysens resultat.

4.1.2 Vilket är resultatet av de olika scenarioanalyserna och vilken tilltro kan resultaten tillmätas?

I SR 97 analyseras:

- Ett basscenario där förvaret tänks vara byggt enligt specifikationer, där inga kapslar har initiala fel och där dagens förhållanden i omgivningen tänks bestå.
- Ett kapseldefektscenario som skiljer sig från basscenariot genom att ett fåtal kapslar tänks vara behäftade med initiala fel.
- Ett klimatscenario som behandlar framtida klimatförändringar.
- Ett jordskalvsscenario.
- Ett scenario som behandlar framtida mänskliga handlingar som kan tänkas påverka djupförvaret.

Basscenariot

I basscenariot analyseras förvarets isolerande funktion under förutsättning att dagens klimat består. Den övergripande slutsatsen är att kapseln behåller sin isolerande förmåga till och med i ett miljonårsperspektiv. Därmed sker inga utsläpp av radioaktiva ämnen från förvaret. Buffertens långsiktiga funktion och berggrundens långsiktiga stabilitet är viktiga frågor i basscenariot. För båda analyseras konsekvenserna av alla kända termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska processer av vikt. Modellstudier och pessimistiska överslagsberäkningar visar att bufferten kan förväntas behålla sin funktion i ett miljonårsperspektiv. På samma sätt visas att geosfären, och särskilt den bergvolym som utnyttjas för deponering, kan förväntas vara stabil över mycket lång tid.

Utvecklingen i buffert och geosfär ger förutsättningar för att kvantifiera den termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska miljön för kapseln. Baserat på detta bedöms kapselns isolering behållas mycket länge. De beräknade säkerhetsmarginalerna mot både mekaniska och kemiska påfrestningar i basscenariot är stora även i ett miljonårsperspektiv.

Analysen förutsätter att temperaturen på kapselytan inte överstiger 100 °C och att vattnet på förvarsdjup är syrefritt. Det förra kan alltid uppnås med en lämplig utplacering av deponeringshål. Omfattande provtagning visar på syrefria förhållanden i grundvattnet på djup större än hundra meter. Att syrefria förhållanden råder på förvarsdjup säkerställs i regel av biologiska processer redan i markskiktet vid grundvattenbildning, dessutom finns en mycket stor potential för syreförbrukning i bl a geosfärens mineral.

Den grundläggande förståelsen för inblandade processer och tilltron till modeller och data diskuteras systematiskt i Processrapporten och i samband med de specifika analyserna i basscenariot. Processförståelse och tilltro kan generellt sägas vara god. De flesta processerna är väl kända och studerade av naturvetenskapen i många decennier. Modeller och data är tillräckligt tillförlitliga för de ofta grova uppskattningar som krävs för att sätta pessimistiska gränser för utvecklingen i basscenariot.

Resultatet av basscenariot är delvis en konsekvens av de säkerhetsprinciper som legat till grund för förvarsutformningen. Koppars är stabilt i förvarets syrefria miljö. Bufferten består av en naturlig lera som hämtats från en geologisk miljö där den var stabil i flera miljoner år. Den svenska berggrunden har varit stabil i ett ännu längre perspektiv.

Kapseldefektscenariot

I kapseldefektscenariot analyseras utvecklingen i en initialt defekt kapsel och den radionuklidspredning som kan bli följden i buffert, geosfär och biosfär. Resultatet blir uppskattningar av dos och risk som kan jämföras med acceptanskriteriet för ett djupförvar.

Den övergripande slutsatsen är att förvaren vid Aberg, Beberg och Ceberg uppfyller acceptanskraven för ett djupförvar. Riskberäkningarna är utformade för att säkert inte underskatta risken.

I avsnitt 4.1.4 nedan diskuteras riskberäkningarna för de tre platserna mer ingående.

Tilltro till data: Osäkerheter i indata till beräkningar av radionuklidtransport har hanterats rigoröst och så långt möjligt på ett enhetligt sätt för alla data. Informationen om osäkerheterna används för att formulera riskberäkningar men också till att värdera olika faktorerens betydelse för beräkningsresultatet. Värderingen ligger till grund för en bedömning av områden där ytterligare forskning kan ge förbättrade kunskaper av värde för säkerhetsanalysen:

- radionuklidomsättning i biosfär,
- bränsleupplösning,
- hydraulisk beskrivning i deponeringshålsskala.

Tilltro till modeller: Kvantifieringen av radionuklidtransport ger det riskmått som direkt jämförs med Strålskyddsinstitutets acceptanskrav. En värdering av tilltron till modellerna för radionuklidtransport är därför viktig.

Kravet på tilltron till en modell måste ställas i relation till användningens syfte. För en säkerhetsanalys är det framför allt viktigt att visa tilltron till att modellerna inte underskattar konsekvenserna.

För grundvattenflöde finns flera olika modellkoncept och i SR 97 jämförs tre olika koncept. Slutsatserna av jämförelsen är att den naturliga variabiliteten hos indata till modellerna påverkar resultatet mer än valet av modell.

Tilltron till modellerna för radionuklidtransport i kapsel, buffert och geosfär bedöms vara tillräcklig. Många grundläggande processer som diffusion och advektion kan ges tillförlitliga matematiska behandlingar i modellerna. Konsekvensen av andra processer, t ex korrosion av kapslingsrör, förenklas genom pessimistiska antaganden. Åter andra, t ex ytdiffusion, hanteras förenklat genom pessimistiska data. Biosfärmodellen innehåller grova pessimistiska förenklingar särskilt för torvekosystemet som ger de största konsekvenserna.

Klimatscenariot

I klimatscenariot utreds konsekvensen av framtida klimatförändringar. Kallare klimat är med stor sannolikhet att förvänta men tidpunkter för omfattande förändringar och storleken av dessa är svåra att förutse. Situationen hanteras i SR 97 med att måla upp en framtida klimatutveckling där huvuddragen styrs av kända astronomiska skeenden, men där den kvantitativa påverkan på förvarssystemet under olika tidsperioder omgärdas av större osäkerheter. Utvecklingen som skisseras omfattar ett stort spann av olika klimatförhållanden. Även om detaljer i utvecklingen aldrig kommer att kunna förutses är tilltron god till att de analyserade förhållandena tillsammans täcker in möjliga klimatförändringar i ett hundratusenårigt perspektiv.

Analysen förenklas avsevärt av att de omfattande klimatrelaterade förändringarna på ytan vid de tre förvarsplatserna bara ger begränsade förändringar på förvarsdjup. Detta möjliggör också formen för analys av konsekvenserna av klimatförändringar, nämligen som en jämförelse med förvarsförhållanden i basscenariot där dagens klimat antas bestå.

Den övergripande slutsatsen av klimatscenariot är att utvecklingen inte leder till att intakta kapslar skadas. Dessutom är den samlade effekten av förändringarna i klimatscenariot på radionuklidtransportprocesser sådan att konsekvenserna i form av doser förväntas bli mindre än i kapseldefektscenariot.

Isolering: Slutsatsen att kapseln förblir intakt nås väsentligen genom att gränssätta de förändringar i temperatur och bergspänningar samt i grundvattnets sammansättning, tryck och flöde som klimatförändringarna orsakar på förvarsdjup. Grundvattentrycket kan gränssättas genom att uppskatta den maximala istjockleken ovan förvaret. För grundvattensammansättningen finns anledning att vänta förändringar i salthalt medan syrehaltigt vatten inte förväntas tränga ner till förvarsdjup annat än möjligtvis under mycket begränsade perioder. Förändringar i bergspänningar kan också gränssättas baserat på istäckets tyngd. Bergspänningarna ger inte deformationer som skadar kapslarna.

Tilltron till att kommande förändringar i förvarssystemet vad gäller isolering ligger inom de uppskattade gränserna är god.

Fördröjning: Klimatförändringar ger också ändrade transportförhållanden för radionuklider i buffert och framför allt geosfär. Förändringarna av transportdata ligger nästan alltid inom ramen för de data som används i kapseldefektscenariot.

Biosfär: Den viktigaste förändringen ligger i en kraftig minskning av konsekvenserna i biosfären eftersom förvarsplatserna är täckta av is eller vatten under övervägande delen av perioden med kallare klimat. Konsekvenserna av initialt skadade kapslar blir därmed **mindre** än i kapseldefektscenariot.

Jämfört med de extrema följdverkningar en nordeuropeisk glaciation har på mänsklighetens livsbetingelser synes effekterna av ett djupförvar på människa och natur vara försumbara.

Jordskalvs/tektonikscenariot

I SR 97 introduceras en ny metod för att analysera konsekvenserna av jordskalv med platspecifika data, både vad gäller geofärens spricksystem och frekvenser och magnituder av jordskalv. Metoden utgör ett första steg i utvecklingen av ett framtida tillvägagångssätt för kvantitativ analys av jordskalvsscenarioer, och innehåller ännu några kraftigt pessimistiska förenklingar. Ändå visar beräkningar redan med denna förenklade modell att sannolikheten för kapselskador under en period av 100 000 år är av samma storleksordning som den som antagits för initiala kapselskador, dvs bråkdelar av en procent av kapslarna berörs.

De pessimistiska antaganden som görs i riskanalysen bedöms med god marginal kunna kompensera för bl a de osäkerheter som har att göra med prediktionen av framtida jordskalv. Risken för kapselskador orsakade av jordskalv framstår därför som försumbar.

Intrångsscenarioer

Listan över mänskliga handlingar som kan påverka förhållandena på en förvaringsplats kan göras lång. Eftersom samhällets och människans utveckling i princip är oförutsägbar kan listan aldrig göras komplett. Med hänvisning till varje generations rätt att själv få välja hur man ska handla under olika förhållanden och deras skyldighet att ta det fulla ansvaret för sina egna handlingar, har det etablerats en praxis att säkerhetsanalysen bara ska hantera oavsiktliga framtida handlingar som kan störa förvaret.

Möjligheterna att kvantifiera riskerna med att människor i framtiden påverkar förvaret är starkt begränsade. Det är inte heller klarlagt på vilket sätt hänsyn till sådana risker ska tas i den totala bedömningen av acceptansen för ett djupförvar.

För att minska sannolikheten för att människans handlingar oavsiktligt ska påverka förvarets säkerhet tar platsvalsprocessen hänsyn till att olika områden kan ha olika potential för alternativa användningar, t ex för brytning av malmer eller ovanliga mineral. Förvaringsdjupet är dessutom ett sätt att undvika både ytliga naturliga störningar och effekter av människans verksamhet.

Sannolikheten för att oavsiktliga handlingar ska störa förvaret kan också påverkas av längden på perioden av institutionell kontroll över förvarsområdet och av hur kunskapen om förvaret kan bevaras för framtiden. Alla analyser av sådana faktorer över mer än ett fåtal hundra år hamnar dock i svårigheten att bedöma hur samhället kommer att utvecklas. En specifik fråga gäller risken för kollaps av samhället med åtföljande förlust av kunskaper och teknisk kompetens.

Frågan om hur eventuella effekter av människors handlingar ska värderas, och vilket ansvar vi idag har för att gardera oss mot en samhällskollaps, har starka inslag av etiska värderingar. En grundläggande utgångspunkt är värderingen att säkerheten bäst gynnas av att det radioaktiva avfallet inte sprids ut, utan placeras i avgränsade förvar.

I SR 97 diskuteras hur tänkbara samhällsutvecklingar och framtida mänskliga handlingar som rör förvaret i någon mån kan kategoriseras och uttryckas som olika scenarier.

I ett illustrerande exempel analyseras en situation där en kapsel i förvaret oavsiktligt penetreras av bergborrhare. Dos och risk beräknas för borrharpersonal och för en familj som bosätter sig på platsen i ett senare skede. Borrharpersonalen kan komma att utsättas för de högsta doserna men risken för både borrharpersonal och familj bedöms ligga långt under acceptanskriteriet, 10^{-6} /år, eftersom sannolikheten för de analyserade händelserna uppskattas vara mycket små.

4.1.3 Sammanvägning av scenarioanalyserna

Total riskbedömning

Den totala risken från ett djupförvar är en summering av riskerna förknippade med alla framtida utvecklingar förvaret kan tänkas genomgå.

I en strikt genomförd riskberäkning ska sannolikheten för varje tänkbar utvecklingsväg uppskattas och multipliceras med den beräknade konsekvensen. Summan av alla sådana delrisker blir den totala risken som jämförs med Strålskyddsinstitutets acceptanskriterium.

Sådana strikta sannolikhetsuppskattningar kan inte göras för ett komplext system som ett djupförvar, för vilket utvecklingen ska analyseras hundratusentals år in i framtiden. Den gängse metoden, som också tillämpas i SR 97, är i stället att samla en rad tänkbara utvecklingsvägar med gemensamma huvuddrag i en uppsättning scenarier. Sannolikheten för varje scenario kan sedan uppskattas eller gränssättas uppåt.

Med de scenariodefinitioner som gäller i SR 97 bör rimligen konsekvenserna av kapseldefekt- och jordskalvsscenarierna adderas till dem för basscenariot utan vikt faktorer. Kapseldefekt- och jordskalvsscenarierna innehåller i sig sannolikhetsfaktorer i form av frekvens för initiala respektive jordskalvsinducerade kapselskador. Båda dessa faktorer har definitionsmässigt uteslutits ur basscenariot.

Inom klimatscenariot diskuteras effekterna av initiala kapselskador och till detta scenario bör även läggas sannolikheten för jordskalvsinducerade skador.

Situationen kompliceras av att man med dagens kunskap inte kan avgöra vilken andel av jordskalvsstatistiken i jordskalvsscenariot som orsakas av kvardröjande effekter av tidigare klimatförändringar och vilken andel som har andra orsaker. Därför adderas alla konsekvenser av jordskalvsscenariot till både bas- och klimatscenarierna.

Resultatet blir då två "superscenarier" där olika effekter adderas. Det ena beskriver utvecklingen då dagens klimatförhållanden består, och inkluderar både initiala kapselskador och jordskalv. Det andra beskriver utvecklingen vid klimatförändringar, med initiala kapselskador och jordskalv. Det senare måste betraktas som en betydligt mer sannolik utveckling än det förra, eftersom klimatförändringar med stor sannolikhet är att förvänta.

I SR 97 har konsekvenser bara beräknats i kapseldefekt- och klimatscenarierna. I basscenariot uppkommer inga radiologiska konsekvenser och inte heller jordskalvsscenariot där analysen är preliminär, förväntas med förfinade analyser och/eller lämplig förvarsutformning, ge några konsekvenser. Därmed blir den samlade risken förknippad med förvaret en sammanvägning av riskerna i kapseldefekt- och klimatscenarierna. Risken i kapseldefektscenariot beräknas för de flesta epoker bli betydligt större än risken i klimatscenariot där biosfärförhållandena ofta ger en kraftig utspädning.

Därför uppskattas i SR 97 pessimistiskt den samlade risken förknippad med förvaret vara lika med den beräknade risken i kapseldefektscenariot.

Enligt Strålskyddsinstitutet kan konsekvenser förknippade med intrångsscenarioer bedömas separat från övriga scenarier och intrångsscenarioerna har därför inte inkluderats i resonemanget ovan.

Generell bedömning av KBS-3-metodens säkerhet

I SR 97 har en fördjupad granskning och integrerad redovisning av den långsiktiga säkerheten för KBS-3-metoden för djupförvaring av använt kärnbränsle genomförts. Resultaten bekräftar den tidigare bilden att ett väl utformat förvar placerat i berg med egenskaper som inte väsentligen skiljer sig från svenskt normalberg har goda förutsättningar att med marginal klara myndigheternas säkerhetskrav.

KBS-3-systemet har en flexibilitet vad gäller förläggningsdjup och utformning som tillåter anpassning till platsspecifika förhållanden, och till den information om bergförhållanden som fortlöpande insamlas under platsundersökningar och utbyggnad.

SKB bedömer att förvarsutformningen som analyseras i SR 97 nått en tillräcklig mognad, att den generella förståelsen för förvarets långsiktiga funktion är tillräckligt god, och att potentialen till hög säkerhet har tillräckliga marginaler för att utgöra en tillfredsställande grund för att genomföra platsundersökningar.

4.1.4 Hur påverkar olika förhållanden i svensk berggrund möjligheterna att bygga ett säkert djupförvar?

I SR 97 analyseras tre platser för att belysa olika förhållanden i svensk granitisk berggrund vad gäller geologi, grundvattenomsättning, vattenkemi, närhet till kust, nordlig eller sydlig förläggning, omgivande biosfär etc.

Ur resultaten av de olika scenarioanalyserna kan en mängd information hämtas för att illustrera betydelsen av varierande förhållanden.

Långsiktig säkerhet, isolering

Basscenariot: I basscenariot är säkerhetsmarginalerna vad gäller isolering mycket stora för alla platser. Det gäller såväl mekaniska som kemiska påfrestningar på kapseln. Grundvattensammansättning varierar något mellan platserna men skillnaderna är betydelselösa vad gäller t ex kopparkorrosion. Platsspecifika bergmekaniska analyser har inte genomförts utan konsekvenserna av den mekaniska utvecklingen på geofärens stabilitet kring förvaret gränssätts med generella och mycket pessimistiska överslag.

Klimatscenariot: Osäkerheterna är stora om de detaljerade utvecklingarna vid platserna, men säkrare uttalanden kan göras om skillnader mellan platserna. Av betydelse för isoleringen är framför allt istäckets mäktighet vid en glaciation. Det tjockaste istäcket förväntas vid Ceberg, där isen också ligger kvar längst. Detta gör att också de mekaniska påfrestningarna på kapseln, både till följd av ökat grundvattentryck och mekanisk belastning på berggrunden blir störst vid Ceberg och minst vid Aberg. Förändringar i grundvattensammansättningen i klimatscenariot bedöms inte ge några platsspecifika skillnader som har betydelse för isoleringen.

Jordskalv: Vad gäller sannolikheterna för jordskalvsinducerade kapselskador ger beräkningar värden som är små och likvärdiga vid de tre platserna. Beräkningarna har i SR 97 gjorts med pessimistiska antaganden som kraftigt påverkar resultatet. Det är därför vanskligt att dra några slutsatser om platsernas relativa lämplighet vad gäller jordskalv. Dessutom kan jordskalvsrisken reduceras genom att ta en större del av berget i anspråk för förvaret. Därmed skulle en eventuell skillnad vad gäller jordskalvsrisker snarare få ekonomiska än säkerhetsmässiga konsekvenser. Skillnader mellan platserna orsakas av

skillnader i den lokala sprickstrukturen i kombination med den valda förvarsinläggningen samt av skillnader i regional jordskalvsstatistik. Skolvstatistiken utgör en av de största osäkerheterna i analysen av jordskalv.

Sammanfattning, isolering: Förhållandena vid såväl Aberg, Beberg som Ceberg ger mycket stora säkerhetsmarginaler för förvarets isolerande förmåga i basscenariot.

Även i klimatscenariot bedöms utvecklingen leda till att isoleringen bibehålls vid samtliga analyserade platser. Säkerhetsmarginalen till mekaniska kapselbrott bedöms här vara minst vid Ceberg och störst vid Aberg.

En preliminär bedömning är att ett säkert förvar vad avser jordskalv kan byggas vid de tre platserna med valda platsspecifika förvarsutformningar. Det är idag inte möjligt att göra några jämförelser av platserna i detta avseende.

Långsiktig säkerhet, utsläppskonsekvenser

Kapseldefektscenariot: Beräkningarna i kapseldefektscenariot (dagens klimatförhållanden) visar att Strålskyddsinstitutets acceptanskrav för ett djupförvar uppfylls med stor marginal för samtliga platser. Marginalen är minst för Aberg och störst för Ceberg. Skillnaden gäller framför allt för tiden efter 100 000 år. Riskberäkningarna har många pessimistiska inslag för att säkert inte underskatta risken.

Om utsläppet sker till en brunn blir risken vid Aberg mindre än en hundradel av acceptanskriteriet om beräkningen görs för en tidsperiod av en miljon år. Risken vid Beberg är cirka fem gånger lägre och vid Ceberg omkring tio gånger lägre än den vid Aberg.

Vid utsläpp till torvekosystem skiljer sig platserna ungefär på samma sätt för tider upp till omkring 100 000 år. I ett miljonårsperspektiv ökar sedan risken vid Aberg med ungefär en faktor 40, vid Beberg en faktor 10 och vid Ceberg marginellt. För tider över 100 000 år dominerar den naturliga radionukliden Ra-226 från bränslets uraninnehåll konsekvenserna för torvekosystemet.

Den beräknade retentionsförmågan är likvärdig vid de tre platserna för långlivade, icke sorberande nuklider. För sorberande nuklider är retentionen starkast vid Ceberg och svagast vid Aberg.

Skillnaderna beror i första hand på skilda hydrauliska genomsläppligheter. Bergmassan i Aberg och Beberg är t ex cirka 100 gånger mer genomsläpplig än den i Ceberg med reservation för att också undersökningsmetodiken skiljer sig mellan platserna.

Klimatscenariot: Den stora skillnaden mellan kapseldefektscenariot och klimatscenariot vad gäller konsekvenserna av utsläpp av radionuklider ligger i de förändrade och gynnsammare biosfärsförhållandena. Samtliga förvarsplatser förväntas vara täckta av is eller hav under stora delar av en kommande hundratusenårsperiod. Biosfärsförhållandena bedöms bli mest gynnsamma vid Aberg som förväntas vara havstäckt under större delen av perioden. Ceberg gynnas minst av klimatförändringarna men även här bedöms konsekvenserna av ett radionuklidutsläpp bli betydligt mindre än i kapseldefektscenariot.

Jordskalv: Utvärderingen av analysen av jordskalvsscenario tyder på att sannolikheten för att få jordskalvsinducerade kapselskador är mycket liten. Därför analyseras inte utsläppskonsekvenser för detta scenario.

Sammanfattning, utsläppskonsekvenser: Också ur denna aspekt bedöms ett med stora marginaler säkert förvar kunna byggas vid samtliga platser. Den sämre retentionen vid Aberg kompenseras av den gynnsammare biosfärsutvecklingen vid platsen. Det är inte meningsfullt att gradera platserna vad avser konsekvenserna av radionuklidutsläpp.

Termiska förhållanden

De termiska förhållandena skiljer något mellan platserna vad gäller temperatur på förvarsdjup och värmeledningsförmåga i berget. De platsspecifika termiska förhållandena bestämmer tillsammans med sprickstrukturen hur stor del av förvarsberget som måste tas i anspråk för att hysa en given mängd bränsle. Det styrande kriteriet är att temperaturen på kopparkapselns yta inte får överstiga 100 °C.

Vid Aberg har de termiska förhållandena i kombination med ett relativt begränsat undersökningsområde lett till att en förvarsutformning i två plan föreslagits, medan enplansförvar föreslås i Beberg och Ceberg.

Skillnaderna i termiska förhållanden har i första hand ekonomisk betydelse eftersom det termiska kriteriet alltid kan uppfyllas om en tillräcklig bergvolym tas i anspråk.

Slutsats

I sammanfattning bedöms att ett säkert djupförvar för använt kärnbränsle enligt KBS-3-metoden kan byggas vid en plats där förhållandena liknar dem vid såväl Aberg, Beberg som Ceberg.

Säkerhetsmarginalerna beräknas bli stora vid samtliga platser. SR 97 har inte givit underlag för att tillmäta skillnader i den långsiktiga säkerheten mellan de tre platserna någon avgörande betydelse vid en tänkt sammanvägning av alla de faktorer som påverkar lokaliseringen av ett djupförvar. Dessa rör t ex teknik, ekonomi, användning av mark, ingrepp i miljö och konsekvenser för samhället.

4.2 Metodik för säkerhetsanalys

Enligt metodikbeskrivningen i avsnitt 1.8 kan analysen beskrivas i fem moment:

- systembeskrivning,
- beskrivning av initialtillstånd,
- val av scenarier,
- analys av scenarier,
- utvärdering.

I SR 97 har flera nya inslag i metodiken provats. Metodiken för de fyra första momenten, liksom hanteringen av osäkerheter diskuteras nedan.

4.2.1 Systembeskrivning

Systembeskrivningen ger en struktur för att beskriva förvarssystemets tillstånd i tid och rum och de processer som över tiden kan förändra detta tillstånd. Med SR 97 introduceras THMC-strukturen för systembeskrivningen.

Formatet för beskrivningen ger en mer renodlad bild av de processer som styr utvecklingen än tidigare beskrivningar som utnyttjat interaktionsmatriser.

En annan viktig fördel är att samma format kan användas i de efterföljande scenarioanalyserna där beskrivningen av utvecklingen genomförs som delvis kopplade termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska delutvecklingar. Med tidigare beskrivningar har det varit svårt att överskådligt visa hur informationen i systembeskrivningen överförts till scenarioanalyserna.

Metodiken i SR 97 är processororienterad och detta understryks av att Processrapporten utgör en hörnsten i systembeskrivningen och därmed också i underlaget för de efterföljande analyserna. I Processrapporten beskrivs alla processer enligt samma format. Erfarenheterna av den första versionen av Processrapporten som används i SR 97 är goda. Angreppssättet har tvingat fram en tydligare redovisning av kunskapsunderlag och möjligheten till kvantifiering för olika processer. Processrapporten behöver genomarbetas inför varje kommande analys.

I systembeskrivningen fastläggs också en rad variabler som visar förvarssystemets tillstånd över tiden. Detta ger en struktur för att beskriva systemets initiala tillstånd som är analysens utgångspunkt. Osäkerheter i initialtillståndet kan därmed studeras systematiskt och bidra till underlaget för val av scenarier.

Variabelindelningen bör också kunna användas för att ge en striktare beskrivning av förvarssystemets utveckling i tiden i kommande säkerhetsanalyser.

Till systembeskrivningen hör också arbetet med att identifiera inre processer och yttre förhållanden som har betydelse för utvecklingen. Slutsatser kring detta finns i avsnitt 4.1.1 ovan.

4.2.2 Val av scenarier

Valet av scenarier i SR 97 är en expertbedömning baserad på tidigare erfarenheter, innehållet i tillgängliga databaser, scenarieval i systerorganisationers säkerhetsanalyser etc. Valet behöver revideras inför kommande analyser men bedöms inte leda till att uppsättningen förändras på något avgörande sätt. En tydligare koppling mellan systembeskrivning, scenarioval och informationsdatabaser bör också göras. Scenariovalet kommer med nödvändighet även i efterföljande analyser ha inslag av expertbedömningar.

I SR 97 är grunden ett basscenario där dagens förhållanden i omgivningen tänkts bestå, trots att klimatförändringar med stor sannolikhet kan förväntas, åtminstone i ett tiotusenårigt perspektiv. Skälet till detta val av basscenario är framför allt att göra en tydlig åtskillnad mellan förändringar orsakade av inre processer i förvaret och sådana som orsakas av växelverkan med en föränderlig omgivning. Dessutom krävs i Strålskydds-institutets föreskrifter uttryckligt att ett fall där dagens förhållanden består ska analyseras. Valet av basscenario i SR 97 kommenteras också under nästa punkt.

Grunden för bedömningen av sannolikheter för att olika scenarier ska bli verklighet är svag. Grova, pessimistiska uppskattningar liknande dem i avsnitt 4.1.3 bedöms bli nödvändiga även i kommande analyser.

4.2.3 Analys av valda scenarier

Ramarna för scenarioanalyserna i SR 97 ges av det initialtillstånd och de omgivningsförhållanden som definieras i respektive scenario. Med dessa förutsättningar analyseras förvarets utveckling till följd av de inre processerna och växelverkan med omgivningen. THMC-formatet har gjort det möjligt att visa hur det komplexa systemet av processer kan lösas upp i huvudsakligen en termisk, en hydraulisk, en mekanisk och en kemisk utveckling med några väsentliga kopplingar dem emellan. Formatet för systembeskrivningen gör det också möjligt att visa hur processer systematiskt hanteras i analyserna.

Scenarioanalyserna utgår från ett basscenario. Utvecklingen i övriga scenarier jämförs sedan med den i basscenarioet. Metoden har varit värdefull, speciellt i analysen av kapseldefekt- och klimatscenerierna. Effekter och osäkerheter orsakade av inre processer kan skiljas från sådana som orsakas av yttre förändringar. Metoden är också naturlig eftersom förvarssystemet är konstruerat för att vara robust: Förvarets funktion ska inte allvarligt påverkas av de förändringar som kan förväntas i omgivningen.

Scenarioanalyserna görs till stor del med modellberäkningar. SKB har tillgång till en stor uppsättning modellverktyg för bl a termiska beräkningar, beräkningar av grundvattenflöde, kemisk utveckling i grundvatten och buffert, och radionuklidspridning i närområde, geosfär och biosfär. Modellerna utvecklas fortlöpande efter behov. Probabilistiska beräkningar har utnyttjats på flera sätt för analyserna i SR 97.

4.2.4 Hantering av osäkerheter

Hantering av kvalitativa och kvantitativa osäkerheter är ett viktigt inslag som berör alla moment i en säkerhetsanalys. Tabell 1-1 i avsnitt 1.8.2 visar hur osäkerheter hanteras i SR 97.

Fullständighet

Frågan om fullständighet i processidentifiering och scenarieval kommenteras i avsnitt 4.1.1.

Konceptuell osäkerhet; processförståelse och modellosäkerhet

Det som ofta benämns konceptuell osäkerhet, med något varierande innebörd i olika sammanhang, har i SR 97 delats in i begreppen "grundläggande processförståelse" och "modellosäkerhet". Med det förra avses den vetenskapliga förståelsen av en process, med det senare de osäkerheter som tillkommer då en process analyseras med en matematiskt modell i en säkerhetsanalys.

Osäkerheter kring den grundläggande förståelsen för olika processer diskuteras i Processrapporten. Det enhetliga formatet för processbeskrivningarna har varit värdefullt för redovisningen av osäkerheter och beskrivningarna kan utvecklas ytterligare i kommande versioner av Processrapporten.

Modellosäkerheter diskuteras där modelleringar förekommer i scenarioanalyserna. Även detta kan i allmänhet genomföras mer systematiskt till kommande analyser. För de viktiga modeller som används vid kvantifiering av radionuklidtransport är hanteringen mer utvecklad. Tre olika konceptuella modeller för grundvattenflöde används med det viktiga resultatet att skillnaderna i förutsägelse är små jämfört med framför allt den naturliga

variabiliteten i berggrunden. Tilltro till modellerna för grundvattenflöde och för radionuklidtransport i närzon och geosfär diskuteras mer ingående. Tilltron till att modellerna inte underskattar konsekvenserna bedöms som god.

Indata

Osäkerheter i indata diskuteras där modelleringar förekommer. Även här är metodiken mest utvecklad för data till radionuklidtransportberäkningar. Alla dessa data finns sammanställda i en egen Datarapport. Metoden att välja rimliga och pessimistiska värden för samtliga data och sedan använda dessa i både probabilistiska och icke probabilistiska analyser har fungerat väl. Bl a har inverkan av olika parametrar på förvarets fördröjande funktion systematiskt kunnat studeras. Metoden för probabilistiska beräkningar visar en framkomlig väg för att genomföra probabilistiska analyser där underlag i form av statistiska data saknas. Metoden är ny och behöver utvärderas inför kommande analyser.

Sammanfattning

De metoder som prövats för hanteringen av osäkerheter i SR 97 har vid den praktiska tillämpningen visat sig användbara. Tillämpningen av metoden kan utvecklas i kommande analyser. De nya metoder som införts för redovisning och hantering av dataosäkerheter för kvantifieringen av radionuklidtransport bedöms kunna utgöra grunden också för kommande redovisningar.

4.2.5 Bedömning av tillgänglig metodik

SKB bedömer med stöd i redovisningen ovan att den metodik som använts i SR 97 utgör en tillräcklig grund inför kommande säkerhetsanalyser baserade på data från platsundersökningar.

4.3 Underlag för platsval och platsundersökningar

SR 97 utgör ett viktigt underlag till ett pågående arbete med syfte att formulera och kvantifiera krav och önskemål som djupförvaret ställer på berget utifrån bl a perspektivet långsiktig säkerhet. Erfarenheter från SR 97 används också i arbetet med att formulera ett samlat program för undersökning och utvärdering av platser.

4.3.1 Vilka krav ställer djupförvaret på berget?

SKB har bedrivit arbetet med att formulera och kvantifiera krav och önskemål på berget parallellt med SR 97. Arbetet kommer att redovisas under år 2000, och en lägesredovisning gjordes i samband med redovisningen av FUD-program 98. Projektet identifierar s k geovetenskapliga lämplighetsindikatorer utifrån en analys av vilka krav och önskemål som kan ställas på förhållanden i berget och bergets egenskaper. Kraven kan ställas både med hänsyn till långsiktig säkerhet och för att det ska vara tekniskt möjligt att bygga förvaret. Bedömningarna av vad som är väsentligt ur perspektivet långsiktig säkerhet bygger på tidigare kunskaper och erfarenheter och på de analyser som genomförts inom ramen för SR 97.

Ett första steg av arbetet bestod i att bestämma vilken geovetenskaplig information som används i säkerhets- och bygghanalys. En sådan inventering redovisades 1996 och har nu stämts av mot den mer omfattande analys som gjorts inom SR 97. I en säkerhetsanalys är det främst informationen om initialtillståndet som måste hämtas från platsspecifika undersökningar.

Eftersom djupförvarets samlade funktion i olika tidsepoker beror på en stor mängd samverkande processer är det svårt att specificera mer detaljerade krav på enskilda initiala förhållanden. Å andra sidan behövs en struktur för lokaliseringsarbetet och en vägledning om vad som är väsentligt att mäta vid en platsundersökning. Därför har alla platsspecifika egenskaper hos ett förvarsberg gått igenom och för var och en ställs frågan om det finns värdeområden som på ett avgörande sätt skulle försämra någon av djupförvarets isolerande eller fördröjande funktioner.

Om det är uppenbart att det finns värdeområden där djupförvarets isolering allvarligt kan hotas ställs kravet att dessa parametervärden *inte* får förekomma. Kunskapen hämtas framför allt från analysen av basscenariot. Förhållanden som kan hota t ex kapselns integritet, t ex förekomst av löst syre accepteras inte och blir därmed underlag för kravformuleringar. Kraven är inte absoluta i den meningen att djupförvaret definitivt skulle vara osäkert om kraven inte uppfylls, men ställs ändå av försiktighet. Kraven kan bara omprövas i ljuset av ny kunskap eller efter förändring av förvarets utformning.

Även om det inte går att finna grund för krav är det ofta möjligt att lägga fast önskemål om värdeområden som bidrar till god isolering eller god fördröjning. Önskemålen ger värdeområden som gynnar en önskad funktion, men behöver inte precisera gränsen till oacceptabel funktion. En sådan gräns påverkas i många fall av andra förhållanden, är relativ, är okänd eller kan påverkas genom förvarsutformning.

Utgångspunkten för önskemål har varit de värdeområden som analyserats i SR 97, kompletterat med ett övervägande om andra värdeområden skulle kunna leda till ännu bättre funktion. Kunskapen hämtas från de detaljerade analyserna av främst basscenariot och kapseldefekts scenariot. På liknande sätt bestäms önskemål på berget ur perspektivet byggbarhet/teknik.

Kraven och önskemålen har formulerats för att ge vägledning i lokaliseringsarbetet och för att kunna prioritera undersökningsinsatser vid platsundersökningar. De ersätter inte behovet av samlade och fullständiga säkerhetsanalyser.

4.3.2 Program för platsundersökningar

Identifieringen av geovetenskapliga lämplighetsindikatorer utgör i sin tur en av de viktigaste utgångspunkterna för SKB:s program för undersökning och utvärdering av platser, som kommer att presenteras under år 2000. Undersökningen ska ge underlag för att bedöma värdeområden för väsentliga geovetenskapliga faktorer på aktuella platser. Kriterier för platsutvärdering används också för att prioritera undersökningarnas omfattning och ger möjlighet till snabbare återkoppling till säkerhetsanalysen när undersökningsresultat blir tillgängliga. Även biosfären på platsen kartläggs.

Platsundersökningsprogrammet omfattar dock mer än den information som efterfrågas av säkerhetsanalysen. Undersökningarna ska ge grund för en övergripande geovetenskaplig förståelse och många undersökningar ger i sig inte direkta data till analyser, utan används när data ska tolkas. Även dessa frågor behandlas och diskuteras då platsundersökningsprogrammet formuleras.

4.4 Underlag för funktionskrav

Enligt SKI:s krav på SR 97 ska säkerhetsanalysen ge underlag för att ”härläda preliminära funktionskrav på kapseln och de övriga barriärerna”.

Säkerhetsanalysen kan göra detta i en generell bemärkelse. Genom studiet av de olika scenarierna beskrivs vilka yttre påfrestningar förvarssystemet kan komma att utsättas för. Förvaret ska enkelt uttryckt konstrueras för att fungera under dessa påfrestningar, vilket är en mycket generell formulering av funktionskrav. Kravet gäller för systemet som helhet. Det är bara i vissa fall möjligt att ur omgivningsförhållanden direkt formulera krav för enskilda barriärer. Ett exempel där detta är möjligt:

Kapseln ska klara de hydrostatiska tryck och svälltryck som förekommer i basscenariot och även de maximala hydrostatiska tryck som kan bli följden av en glaciation. Båda dessa tryck kvantifieras i SR 97 och därmed utgör analysen underlag för funktionskrav på kapseln, som ska behålla sin isolerande funktion vid dessa tryck.

När det gäller tektoniska förändringar blir det svårare att formulera funktionskrav. Effekten av ett jordskalv kan styras med förvarsutformningen och även om denna lagts fast beror effekterna av ett jordskalv av utformningen av kombinationen kapsel/buffert. De mekaniska effekterna på kapseln styrs bl a av bufferttjockleken och det är kombinationen av de två barriärerna som bestämmer funktionen.

Från grundvattensammansättningen i de olika scenarierna kan funktionskrav härledas för bufferten: Bufferten ska behålla sin avsedda funktion då grundvattnet har de sammansättningar som kan bli aktuella vid förvarsplatsen under olika tidsepoker i både bas- och kapseldefekts scenarierna. SR 97 ger ett kvantitativt underlag för detta i form av uppskattningar av de olika sammansättningar som kan bli aktuella i svensk berggrund.

Funktionskrav för kapseln kan inte lika uppenbart härledas ur grundvattensammansättningen: Bufferten och kapseln bestämmer tillsammans hur kapselns isolerande funktion klarar de kemiska påfrestningarna. Funktionskrav för kapseln kan inte härledas direkt ur resultatet från analysen, däremot ska funktionen hos systemet kapsel/buffert vara sådan att kapselns isolering inte äventyras i ett långt tidsperspektiv.

Säkerhetsanalysen kvantifierar omgivningsförhållandena och talar sedan om huruvida den valda systemutformningen fungerar under dessa förhållanden. Däremot är analysmetodiken i allmänhet inte inriktad på att utreda vilka detaljerade egenskaper barriärerna (minst) måste ha för att ”tåla” påfrestningarna. Detta s k inversproblem har för övrigt inte någon entydig lösning.

SR 97 ger således kvantitativt underlag i form av grundvattensammansättningar, -flöden och -tryck, berg rörelser och annat som kan användas för att eventuellt modifiera förvarsutformningen, men det är endast i få fall som funktionskrav direkt kan härledas ur analysresultatet.

Översyn av förvarets utformning

Utformningen av djupförvaret är baserad på det primära kravet att förvaret ska isolera avfallet från människa och miljö. Om isoleringen av någon anledning skulle brytas ska förvaret i andra hand ha en fördröjande funktion. Med utgångspunkt från dessa grundläggande funktionskrav fastläggs mer detaljerade funktionskrav för kapseln och de övriga barriärerna. Utöver kraven för den långsiktiga säkerheten tillkommer krav för att möjliggöra tillverkning, bygge och drift.

Den detaljerade förvarsutformningen kommer stegvis att utvecklas i ett långsiktigt arbete och under tiden genomförs ett antal säkerhetsanalyser. Resultatet från varje analys återförs till arbetet med förvarsutformningen och leder eventuellt till modifieringar av funktionskrav, konstruktionsförutsättningar och utformning av olika delar. Ändringar av detaljer i utformningen initieras också av erfarenheter från utvecklingen av teknik för utförande av de olika delarna i förvaret. Den modifierade utformningen blir sedan utgångspunkten för nästa säkerhetsanalys.

Resultatet av arbetet med SR 97 kommer att användas som ett underlag för en översyn av de funktionskrav och konstruktionsförutsättningar som bestämmer utformningen av kapseln och de övriga barriärerna i djupförvaret.

4.5 Prioritering av forskning

Erfarenheterna från SR 97 utgör också en grund för utveckling av metodiken för kommande säkerhetsanalyser liksom för prioriteringar i programmen för stödjande forskning, utveckling och teknikdemonstration.

Metodik för säkerhetsanalys

Programmet för vidareutveckling av säkerhetsanalysmetodik enligt FUD-98 kommer att utvärderas med hänsyn till erfarenheterna från SR 97 och dess granskning. Behov inför kommande säkerhetsanalyser som identifierats i SR 97 är bl a:

- en reviderad Processrapport,
- en utredning av möjligheterna till ett mer systematiskt scenarioval samt,
- en utvärdering av probabilistiska beräkningsmetoder.

Stödjande forskning

I programmet för stödjande forskning kan resultatet av SR 97 användas för prioriteringar vad gäller FoU-insatser kring djupförvaring av använt kärnbränsle. Förutom årliga programöversikter, kommer en mer genomgripande revision att göras i anslutning till FUD-program 2001. Resultaten av SR 97 antyder flera områden som kan behöva prioriteras, bl a:

- biosfärmodellering,
- jordskalvsmodellering,
- långsiktiga effekter av kryprörelser i berget,
- de mekaniska effekterna på kapseln vid tektoniska berggrörelser, bl a krypeffekter i kopparhöljet,
- återfyllningens funktion i allmänhet,
- erosion av buffert och återfyllning under olika klimatförhållanden,
- den hydromekaniska utvecklingen av spalten mellan kapsel och buffert i tidiga skeden,

- modeller för hydrologi och radionuklidtransport i detaljskala kring deponeringshål för att möjliggöra optimala val av deponeringshål.
- bränsleupplösning.

Behoven har identifierats antingen direkt i Processrapporten eller då den integrerade utvecklingen till följd av flera kopplade processer studerats i säkerhetsanalysen. Ofta skulle nya rön kunna leda till mindre pessimistiska hanteringar i säkerhetsanalysen.

Kvalitetskontroll

Kvalitetskontroll är väsentligt för att säkerställa analysernas tillförlitlighet. Kvalitetsaspekter kan läggas på data, modeller och värderingar. Spårbarhet och möjlighet att återskapa resultat är andra viktiga aspekter. Ett QA-kontrollerat system för datainsamling och databevarande har prövats vid Äspö-laboratoriet. Ett versionshanteringssystem har utnyttjats för modeller för grundvattenflöde och radionuklidtransport i SR 97. För dessa beräkningar arkiveras förutsättningar, indata och resultat digitalt med gängse säkerhetsrutiner eller som papperskopior enligt SKB:s arkivregler.

Rutinerna för kvalitetskontroll av säkerhetsanalysen behöver utvecklas. SKB avser att företaget ska vara certifierat med ett komplett QA-system enligt ISO 9001 när platsundersökningarna påbörjas. Säkerhetsanalysen omfattas av certifieringen.

4.6 Slutord

Det kommande steget i lokaliseringen av ett djupförvar innebär att berggrunden vid ett antal kandidatplatser för ett förvar ska undersökas. Huvudsyftet med SR 97 är att inför det steget ”göra troligt att KBS 3-metoden har goda förutsättningar att uppfylla de säkerhets- och strålskydds krav som SKI och SSI preciserat de senaste åren”.

De strålnivåer som svenska myndigheter accepterar för individer i närheten av ett djupförvar ligger kring en procent av den naturliga bakgrundsstrålningen. Resultaten av analyserna i SR 97 visar maximala nivåer som är mindre än en tiondel av myndighetskraven. De maximala nivåerna uppkommer tiotusentals år in i framtiden och under de förhållandevis korta tidsintervall då tänkbara förvarsplatser i Sverige inte förväntas vara täckta av inlandsis eller hav.

Resultaten ska också ses i ljuset av det försiktiga förhållningssätt som genomsyrar utförandet av säkerhetsanalysen. Om kunskapen inom något område inte är fullständig antas pessimistiskt ett sämre utfall än vad som är rimligt att förvänta.

SR 97 visar att förutsättningarna för att bygga ett säker djupförvar för använt kärnbränsle i svensk granitisk berggrund är mycket goda. Analysen är i ett internationellt perspektiv omfattande och detaljerad mot bakgrund av det steg SKB står inför.

Det är SKB:s bedömning att säkerhetsanalysens omfattning och tilltron till dess resultat väl uppfyller de krav som bör ställas inför ett sådant steg.