

Långsiktig säkerhet för slutförvar för använt kärnbränsle vid Forsmark och Laxemar – en första värdering

Förenklad svensk sammanfattning av säkerhetsanalysen SR-Can

Svensk Kärnbränslehantering AB

April 2007

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



Långsiktig säkerhet för slutförvar för använt kärnbränsle vid Forsmark och Laxemar – en första värdering

**Förenklad svensk sammanfattning av
säkerhetsanalysen SR-Can**

Svensk Kärnbränslehantering AB

April 2007

Förord

Denna rapport är huvudsakligen en förenklad svensk sammanfattning av huvudrapporten från säkerhetsanalysen SR-Can, SKB TR-06-09, som publicerades i november 2006. Den rapporten ger en preliminär bedömning av den långsiktiga säkerheten för KBS-3-förvar för använt kärnbränsle vid SKB:s två kandidatplatser i Forsmark och Oskarshamn och är författad på engelska för experter inom området.

För att ge en mer lättillgänglig text följer strukturen här inte helt den hos den fullständiga rapporten. En del material har dessutom hämtats från rapporten ”Använt kärnbränsle – hur farligt är det?”, SKB R-97-02, för att ge en mer fullständig bild av bränslets farlighet över tid.

Rapporten är avsedd för en läsare som utan specialkunskaper vill få en djupare inblick i vad en säkerhetsanalys är och vilka resultaten blev av säkerhetsanalysen SR-Can. Detta kräver en viss stringens i framställningen och texten kan därför ibland vara krävande.

Stora delar av texten är bearbetningar av översatta avsnitt av den engelska huvudrapporten från säkerhetsanalysen SR-Can. Översättningarna är gjorda av Tecnita AB. Andra delar är nyskrivna förenklande sammanfattningar av centrala delar av säkerhetsanalysen. Det gäller framför allt scenarieanalyserna i kapitel 6 och delar av diskussionen om tilltron till säkerhetsargumentationen i avsnitt 7.7. Nyskrivningar och bearbetningar har till största delen gjorts av undertecknad och har sedan granskats av experterna som deltog i säkerhetsanalysen SR-Can. I början av varje kapitel anges vilket material kapitlet ifråga bygger på, som en hänvisning för den som vill veta mer. Hela denna rapport ska dock kunna läsas som en sammanhängande text utan stöd av det underliggande materialet.

Stockholm i april 2007

Allan Hedin
Projektledare SR-Can

Innehåll

Sammanfattning och läsanvisning	7
1 Sammanhang och bakgrund för säkerhetsanalysen SR-Can	9
1.1 SKB:s kärnbränsleprogram	9
1.2 Rapportering av långsiktig säkerhet under platsundersökningsskedet	10
1.3 Syften med säkerhetsanalysen SR-Can	11
1.4 Myndigheternas krav på analys och säkerhet	11
1.4.1 Föreskrifter för ett slutligt omhändertagande av använd kärnbränsle, SSI FS 1998:1	12
1.4.2 Statens kärnkraftinspektion föreskrifter om säkerhet vid slutförvaring av kärnavfall, SKIFS 2002:1	12
1.5 Relaterade projekt	13
1.5.1 Platsundersökningar och platsmodellering	13
1.5.2 Förvarsprojektering	14
1.5.3 Kapselutveckling	14
2 Problem – bränslets farlighet	15
2.1 Inledning	15
2.2 Basfakta om radionuklidor	15
2.3 Framställning av kärnbränsle	17
2.4 Radioaktivitet hos använd kärnbränsle	19
2.4.1 Fissions- och aktiveringsprodukter samt aktinider	19
2.4.2 Jämförelse mellan mineral och bränslecykelns fraktioner	21
2.5 Resteffekt hos använd kärnbränsle	22
2.6 Hur skadar strålningen människan?	24
2.6.1 Allmänt om farlighet hos strålning	24
2.6.2 Externbesträlnings	25
2.6.3 Internstrålning	27
2.6.4 Jämförelse mellan mineral och bränslecykelns fraktioner	27
2.7 Tidsskalor	30
2.7.1 Krav och rekommendationer från svenska myndigheter	30
2.7.2 Tidsskalor i säkerhetsanalysen	30
2.7.3 Tidsskalor av betydelse för förvarets utveckling	31
3 Den föreslagna lösningen – ett KBS-3-förvar	33
3.1 Inledning	33
3.2 Säkerhetsprinciper som legat till grund för utformningen	33
3.3 KBS-3-förvaret	34
3.3.1 Bränslet	35
3.3.2 Kapseln	36
3.3.3 Bufferten	38
3.3.4 Återfyllningen i deponeringstunneln	39
3.3.5 Egenskaper hos de tillverkade barriärerna av särskild betydelse för säkerheten	39
3.4 Platserna och förvarslayouterna	39
3.4.1 Från platsdata till SR-Can	39
3.4.2 Forsmark	40
3.4.3 Laxemar	42
3.4.4 Förvarslayouter	43
3.5 Säkerhetsfunktioner – vad ska barriärerna göra?	44
3.5.1 Kapselns säkerhetsfunktioner	45
3.5.2 Buffertens säkerhetsfunktioner	45
3.5.3 Tunnelåterfyllningens säkerhetsfunktioner	46
3.5.4 Bergs säkerhetsfunktioner	46
3.5.5 Sammanfattning av säkerhetsfunktioner	47

4	Säkerhetsanalysen – metoden för att värdera lösningen	49
4.1	Inledning	49
4.2	Metodik för SR-Can	50
5	Referensutvecklingen – ett exempel på framtid	55
5.1	Inledning	55
5.2	Yttre förhållanden	55
5.3	Byggnads- och driftsfasen	56
5.4	Den första tempererade perioden	57
5.5	Den första glaciationscykeln	58
5.5.1	Modellstudier av inlandsisar och permafrost	58
5.5.2	Konsekvenser för förvarets säkerhet	60
5.6	Tiden efter den första glaciationscykeln, fram till en miljon år	62
5.7	Växthusvarianten	62
5.8	Radiologiska konsekvenser för referensutvecklingen	62
6	Scenarierna – kan säkerhetsfunktionerna slås ut?	63
6.1	Inledning	63
6.2	Val av scenarier	63
6.3	Huvudscenariot	64
6.4	Kan bufferten frysas?	66
6.5	Kan bufferten omvandlas kemiskt?	66
6.6	Kan bufferten försvinna?	68
6.7	Kan kapseln korroderas sönder?	69
6.8	Kan kapseln skadas av trycket från grundvattnet och bentonitleran?	72
6.8.1	Vad tål kapseln?	72
6.8.2	Buffertens svälltryck	72
6.8.3	Grundvattentryck	73
6.8.4	Slutsatser	74
6.9	Kan kapseln skadas av jordskalv?	74
6.9.1	Hur stora rörelser tål kapseln?	75
6.9.2	Låg förekomst av stora skalv i Sverige	75
6.9.3	Jordbävningssäker konstruktion	76
6.9.4	Slutsatser	77
6.10	Intrång och andra framtida mänskliga handlingar	77
6.10.1	Inledning	77
6.10.2	Principer och metod för hantering av framtida mänskliga handlingar	79
6.10.3	Val av representativa fall	80
6.10.4	Analys av de valda fallen	82
6.11	Sammanfattning samt kombinationer av scenarier	82
6.12	Vad händer om vi tar bort barriärerna?	84
6.12.1	Inledning	84
6.12.2	Resultat och diskussion	85
7	Huvudsakliga resultat och slutsatser	87
7.1	Uppfyllelse av riskkriteriet	87
7.2	Frågor relaterade till framtida istider	87
7.3	Andra frågor relaterade till barriärkonstruktion och -funktion	89
7.4	Beräknade individrisker	90
7.5	Ytterligare resultat och slutsatser	91
7.6	Vilka frågor återstår?	92
7.7	Tilltro till säkerhetsargumentationen	92
7.7.1	Inledning	92
7.7.2	Vetenskapen och tidsperspektivet 100 000 år	93
7.7.3	Tilltro till analysens resultat	94
7.7.4	Gränssättande fall	95
7.8	Slutord	96
8	Referenser	97

Sammanfattning och läsanvisning

Denna rapport är huvudsakligen en förenklad svensk sammanfattning av huvudrapporten från säkerhetsanalysen SR-Can.

Kapitel 1 beskriver *sammanhanget* inom vilket säkerhetsanalysen SR-Can gjorts. Här beskrivs SKB:s program för omhändertagande av använt kärnbränsle med tonvikt på den pågående fasen där två kandidatplatser för ett slutförvar undersöks. Här beskrivs också säkerhetsanalysens roll under platsundersökningsfasen och mer i detalj syftena med säkerhetsanalysen SR-Can. De föreskrifter från Statens kärnkraftinspektion, SKI, och Statens strålskyddsinsitut, SSI, som rör såväl de säkerhetskrav ett slutförvar ska uppfylla som vilken redovisning som krävs i en säkerhetsanalys beskrivs översiktligt. Ett viktigt krav är SSI:s riskkriterium som säger att den årliga risken att drabbas av cancer eller ärfliga skador av stråldoser orsakade av utsläpp från förvaret inte får överskrida en på miljonen för de individer som utsätts för de största riskerna. Något förenklat innebär det att människor i förvarets närhet i framtiden inte får utsättas för stråldoser som överskider cirka en procent av den naturliga bakgrundstrålningen i Sverige idag.

I kapitel 2 ges en relativt fyllig bild av farligheten hos använt kärnbränsle och hur den avtar med tiden. Detta kan ju sägas vara det *problem* slutförvaret är avsett att lösa. Kapitlet bygger till stor del på material utanför säkerhetsanalysen SR-Can. I detta kapitel diskuteras också olika tidsperspektiv av relevans för säkerhetsanalysen eftersom tidsperspektiven är relaterade till hur bränslets farlighet utvecklas.

I kapitel 3 beskrivs *den föreslagna lösningen* på problemet, det vill säga ett KBS-3-förvar där det använda bränslet placeras i kopparkapslar med en insats av gjutjärn, omges av en buffert av bentonitlera och deponeras på cirka 500 meters djup i granitiskt berg. I kapitlet ges också en sammanfattande beskrivning av berget vid de två kandidatplatser där SKB bedriver platsundersökningar, nämligen Forsmark i Östhammars kommun och Laxemar i Oskarshamns kommun. Slutligen beskrivs de *säkerhetsfunktioner* som kapsel, buffert och berg har i KBS-3-förvaret. Dessa funktioner har en central roll i analysen av förvarets säkerhet.

I kapitel 4 beskrivs hur säkerhetsanalysen är uppbyggd, det vill säga *metoden för att värdera förvarets säkerhet*. Den går kortfattat ut på att utreda huruvida den utveckling förvaret på sikt genomgår kan leda till skador på kapslarna och därmed till utsläpp av radioaktiva ämnen samt att visa vilka konsekvenserna av dessa eventuella utsläpp blir.

I kapitel 5 sammanfattas en viktig komponent i säkerhetsanalysen, nämligen en *referensutveckling* för förvaret. Referensutveckling kan sägas vara ett rimligt exempel på en framtid utveckling för förvaret och de konsekvenser denna utveckling har för förvarets säkerhet. Ett viktigt tidsperspektiv är tiden för en fullständig istidscykel, vilket är omkring 120 000 år. I referensutvecklingen för SR-Can antas att den senaste istidscykeln, Weichselistiden, upprepas. Av referensutvecklingen framgår att förvaret kan förväntas utsättas för de största påfrestningarna just i samband med framtidens istider.

Referensutvecklingen utgör grunden för att analysera mer extrema händelseutvecklingar. Detta görs i ett antal *scenarier* i kapitel 6. Kapitlet inleds med en beskrivning av hur scenarierna valts i SR-Can. Säkerhetsfunktionerna (kapitel 3) ligger till grund för valet och scenarierna syftar till att, för varje funktion, klärlägga om den på något sätt kan tänkas slås ut. Mycket av analyserna handlar om huruvida kapseln kan förlora sin isolerande förmåga och huruvida lerbufferten kring kapslarna uppträder som avsett också på mycket lång sikt. Även kombinationer av flera scenarier analyseras. Sist i kapitlet studeras vad som händer om man hypotetiskt antar att viktiga säkerhetsbärande komponenter i förvaret, som kapslarna och lerbufferten, tas bort. Syftet är att belysa betydelsen av de olika barriärerna för säkerheten samt att sätta gränser för vilka konsekvenserna skulle bli i ett slags hypotetiskt ”värsta fall”.

I kapitel 7 sammanfattas de huvudsakliga *slutsatserna* från säkerhetsanalysen SR-Can. Ett viktigt resultat är att KBS-3-förvar vid de två platserna bedöms uppfylla SSI:s riskkriterium, men att det är angeläget med mer platsdata från kandidatområdet i Laxemar. Analysen ger också viktiga resultat i form av återkoppling till SKB:s forskningsprogram genom att peka på frågor som behöver utredas vidare. Hit hör frågan huruvida värmen från det använda bränslet kan tänkas leda till att berget allra närmast kapslarnas deponeringshål spricker samt frågan om bufferten på riktigt lång sikt kan tänkas försvinna ut i bergssprickor som eventuellt korsar ett deponeringshål. Också tilltron till analysens resultat diskuteras i detta kapitel.

I kapitel 8 ges ett fåtal referenser, mestadels till centrala rapporter från säkerhetsanalysen SR-Can.

1 Sammanhang och bakgrund för säkerhetsanalysen SR-Can

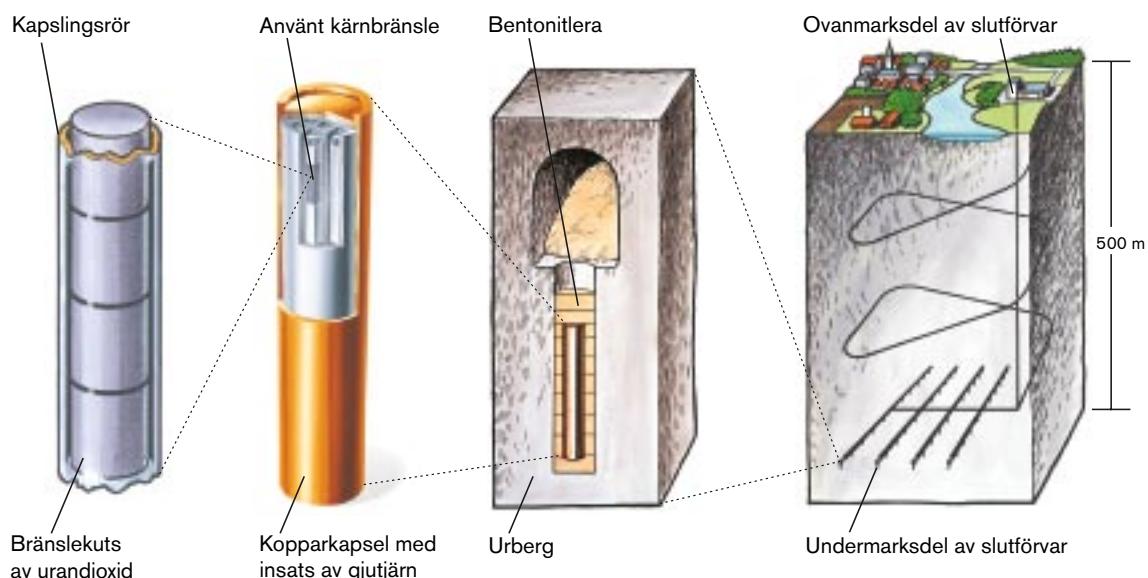
Detta kapitel är snarlikt kapitel 1 i huvudrapporten SR-Can.

1.1 SKB:s kärnbränsleprogram

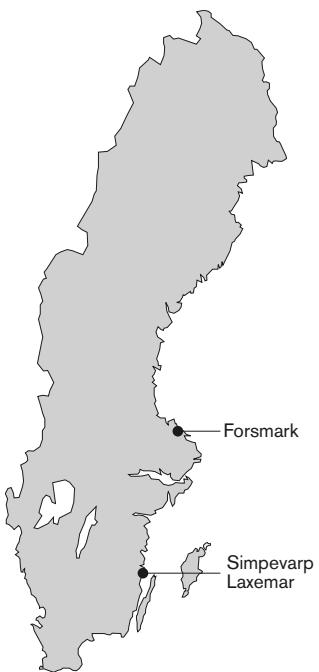
Radioaktivt avfall från svenska kärnkraftverk tas om hand av Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB. Inom SKB:s program för omhändertagande av använt kärnbränsle finns idag (våren 2007) ett centralt mellanlager för använt kärnbränsle (Clab) och ett transportsystem. Flera decenniers forskning och utveckling har lett SKB till att förorda KBS-3-metoden för slutförvaring av använt kärnbränsle. Enligt denna metod placeras bränslet i kopparkapslar med en gjutjärnsinsats. Kapslarna deponeras på cirka 500 meters djup i granitiskt berg och omges av bentonitlera, se figur 1-1. Sveriges kärnenergiprogram förväntas ge upphov till drygt 9 000 ton använt kärnbränsle, motsvarande omkring 4 500 kapslar i ett KBS-3-förvar.

Två huvudsakliga återstående uppgifter i programmet är att lokalisera, bygga och driva ett *slutförvar* av KBS-3-typ och en *inkapslingsanläggning* där det använda kärnbränslet placeras i kapslar som sedan deponeras i förvaret.

SKB genomför för närvarande platsundersökningar för ett slutförvar i Östhammar (Forsmarksområdet) och Oskarshamn (delområdena Simpevarp och Laxemar), figur 1-2. Undersökningarna genomförs i två steg, en inledande fas som följs av en kompletterande fas, om data från den inledande fasen bekräftar den aktuella platsens lämplighet. Målet är att bygga ett slutförvar vid en av dessa kandidatplatser, förutsatt att urberget och andra relevanta förhållanden befinner vara lämpliga. Ansökningar enligt kärntekniklagen och miljöbalken om att få uppföra och driva slutförvaret kommer enligt aktuella tidplaner att inges i slutet av 2009. Den inledande fasen har avslutats och SKB beslutade att fortsätta undersökningarna vid Forsmark och vid delområdet Laxemar vid Oskarshamn. Undersökningarna vid Simpevarp har avbrutits eftersom delområdet, trots sin bedömda lämplighet med avseende på långsiktig säkerhet, är mindre flexibelt sett till tillgängligt utrymme för deponering än delområdet Laxemar.



Figur 1-1. KBS-3-metoden för slutförvaring av använt kärnbränsle.



Figur 1-2. Kandidatplatserna för ett slutförvar.

Det förordade alternativet för lokalisering av inkapslingsanläggningen är i Oskarshamn, i anslutning till den befintliga mellanlagringsanläggningen Clab. I november 2006 lämnade SKB in en ansökan enligt kärntekniklagen om att få uppföra och inneha en inkapslingsanläggning för använt kärnbränsle och om att få driva denna gemensamt med Clab.

1.2 Rapportering av långsiktig säkerhet under platsundersökningsskedet

Det övergripande målet för rapporteringen av långsiktig säkerhet under platsundersöknings-skedet är att ta fram en säkerhetsrapport som underlag för ansökningarna om att bygga och driva ett slutförvar. Den säkerhetsrapporten, kallad SR-Site-rapporten, ska baseras på hela dataunderlaget från platsundersökningarna.

SR-Can-rapporten (som sammanfattas här) är en förberedelse för SR-Site-rapporten. Projektet som tagit fram denna rapport kallas av historiska skäl för SR-Can¹, och den termen återkommer ofta i rapporten och i de dokument den refererar till. Huvudsyftena med rapporten är att genomföra en första analys av den långsiktiga säkerheten för ett slutförvar vid platserna Forsmark och Laxemar, baserad på data från den inledande platsundersökningsfasen, samt att bereda ansvariga myndigheter tillfälle att granska metodiken för säkerhetsanalysen och SKB:s tolkning av tillämpliga föreskrifter.

En interimsversion av SR-Can-rapporten, fokuserad på metodik, publicerades i september 2004. Rapporten har senare granskats av SKI och SSI, stödda av en utvärdering av en internationell granskningsgrupp. Myndigheternas synpunkter har tagits om hand vid slutförandet av SR-Can-projektet. I bilaga C i den engelska huvudrapporten SR-Can redovisas detta mer i detalj.

¹ Namnet SR-Can anspelar på engelskans "canister" (kapsel). "SR" står för säkerhetsrapport. Projektet fick sitt namn eftersom det ursprungligen var avsett att ge underlag för ansökan om att bygga och driva en inkapslingsanläggning. För den tillämpningen krävs dock inte längre någon rapport om den långsiktiga säkerheten. Av praktiska skäl har projektnamnet SR-Can-projektet behållits, eftersom det är väl etablerat.

Dessutom har preliminära säkerhetsbedömningar för varje plats genomförts som deluppgifter inom SR-Can-projektet. Huvudsyftet med dessa utvärderingar var att fastställa om tidigare bedömningar av kandidatområdenas lämplighet för ett slutförvar, med avseende på den långsiktiga säkerheten, kvarstod i ljuset av tillkommande data från borrhål och andra data som samlats in vid platserna. Vidare skulle de ge återkoppling för att fortsätta platsundersökningar och platsspecifik slutförvarskonstruktion. De generella slutsatserna från dessa utvärderingar är att platserna är väl lämpade för ett slutförvar. Flera frågor som kräver ytterligare analys har identifierats och har beaktats i SR-Can-projektet.

En variant med horisontell placering av avfallskapslar, KBS-3H, studeras inom ett gemensamt forskningsprojekt mellan SKB och Posiva, den finska organisationen för kärnavfallshantering. Vid mitten av 2007 ska en säkerhetsanalys av KBS-3H-varianten presenteras av Posiva, med den finska platsen Olkiluoto som referensplats. I såväl SR-Can- som SR-Site-projekten behandlas endast den vertikala kapselplacering som illustreras av figur 1-1.

1.3 Syften med säkerhetsanalysen SR-Can

Som nämnts är säkerhetsanalysen SR-Can ett förberedande steg inför SR-Site-analysen, som ska ligga till grund för SKB:s ansökningar om att få bygga och driva ett slutförvar. Säkerhetsanalysen SR-Can har följande syften:

1. Att preliminärt bedöma säkerheten för KBS-3-förvar vid Forsmark och Laxemar med kapslar enligt inlämnad ansökan för inkapslingsanläggningen.
2. Att ge återkoppling till kapselutveckling, till anläggningsutformning för slutförvaret, till fortsatta platsundersökningar, till SKB:s program för forskning kring frågor av betydelse för långsiktig säkerhet samt till kommande säkerhetsanalyser.
3. Att bereda SKI och SSI tillfälle att granska SKB:s preliminära säkerhetsredovisning inför tillämpningen i ansökningarna om ett slutförvar för använt kärnbränsle.

Efter hand som SKB:s program för hantering av det använda kärnbränslet forskrider utvecklas inkapslingstekniken ytterligare. Valet av material för buffert och återfyllning, liksom procedurer för tillverkning och deponering av tekniska barriärer, kommer att specificeras närmare. Även platserna blir allt bättre beskrivna och byggnadstekniken kommer att detaljeras. Säkerhetsanalyser vid olika steg i programmet bygger på den information som finns tillgänglig vid den aktuella tidpunkten. Information om alla komponenter måste finnas vid varje steg eftersom säkerheten är beroende av alla dessa element. Fokuseringen på en specifik analys kommer emellertid inte att styras bara av tillgänglig information utan även av analysens syfte, det vill säga det eller de beslut som analysen är avsedd att ge stöd för.

Syftet med SR-Can är att undersöka om KBS-3-metoden har potential att uppfylla myndigheternas säkerhetskriterier, givet förhållandena i förvarsberget vid platserna i den utsträckning de kan specificeras efter den inledande fasen av platsundersökningarna. Syftet med SR-Can är inte att slutgiltigt fastställa lämpligheten hos de studerade platserna – detta görs i SR-Site. Syftet är inte heller att slutgiltigt etablera de tekniska systemen för avfallsdeponering – utan snarare att undersöka säkerheten hos systemet så som det för tillfället är specificerat, och att ge återkoppling för ytterligare utveckling av den specifikationen.

1.4 Myndigheternas krav på analys och säkerhet

Utformning av och innehåll i en säkerhetsanalys, och framför allt de kriterier som ska användas för att bedöma förvarets säkerhet, anges i föreskrifter från SKI och SSI. Föreskrifterna utgår från ramlagar, varav de viktigaste är Kärntekniklagen och Strålskyddslagen. Nationell lagstiftning, däribland den svenska, påverkas ofta av internationella regler och rekommendationer.

Vad gäller den långsiktiga säkerheten för slutförvar för kärnavfall finns två mera detaljerade föreskrifter av särskild vikt, utfärdade av SSI respektive SKI:

- ”Statens strålskyddsinstituts föreskrifter om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall” (SSI FS 1998:1).
- ”Statens kärnkraftinspektions föreskrifter om säkerhet vid slutförvaring av kärnavfall” (SKIFS 2002:1).

Dessa två dokument återges i sin helhet på engelska i Bilaga A till huvudrapporten SR-Can. Hanteringen av föreskrifternas krav i SR-Can-projektet beskrivs i bilagan genom referenser till tillämpliga avsnitt i huvudrapporten, i form av inskjutna stycken i lagtexterna i bilagan. På så sätt vill SKB uppnå en tydlighet i hur myndigheternas krav omhändertas i säkerhetsanalysen.

1.4.1 Föreskrifter för ett slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle, SSI FS 1998:1

De mest relevanta delarna för analys av långsiktig säkerhet i SSI FS 1998:1 anger följande:

- Skydd av människors hälsa ska påvisas genom uppfyllande av ett riskkriterium som anger att ”den årliga risken för skadeverkningar inte får överskrida 10^{-6} för en representativ individ i gruppen som exponeras för störst risk”. Med ”skadeverkningar” avses cancer och ärfliga skador. Riskgränsen motsvarar, enligt SSI, en dosgräns på cirka $1,4 \cdot 10^{-5}$ Sv/år, det vill säga cirka en procent av den naturliga bakgrundssstrålningen i Sverige. (Dessa begrepp förklaras närmare i kapitel 2.)
- Med avseende på miljöskydd ska biologiska effekter av joniserande strålning på grund av utsläpp av radioaktivt material från förvar till livsmiljöer och ekosystem av betydelse, beskrivas utgående från tillgänglig kunskap.
- Konsekvenserna av intrång i ett slutförvar ska rapporteras och skyddsformågan för förvaret efter intrång ska beskrivas.
- SSI kräver en mera detaljerad bedömning för de första 1 000 åren efter förslutning av slutförvaret än för senare tidpunkter.

SSI har också utfärdat Allmänna råd med avseende på tillämpning av SSI FS 1998:1. Där ges mera detaljerad information om ovannämnda aspekter.

I de allmänna råden anges att tidsskalan för en säkerhetsanalys av ett slutförvar för använt kärnbränsle bör vara en miljon år efter förslutning. Det framgår också att den ovan citerade riskgränsen är tillämplig fram till cirka 100 000 år efter förslutning. För perioden bortom hundra tusen år anger SSI att beräknade risker kan användas för att diskutera om förvaret utformats så bra som rimligen är möjligt.

1.4.2 Statens kärnkraftinspektions föreskrifter om säkerhet vid slutförvaring av kärnavfall, SKIFS 2002:1

De mest relevanta delarna för analys av långsiktig säkerhet i SKIFS 2002:1 anger följande:

- Säkerhetsanalyserna ska omfatta förhållanden, händelser och processer vilka kan leda till spridning av radioaktiva ämnen efter förslutning.
- En säkerhetsanalys ska omfatta så lång tid som barriärfunktioner behövs, dock minst tiotusen år.
- Rapportering krävs av
 - metoder för systembeskrivning och systemutveckling,
 - metoder för val av scenarier, bland annat ett huvudscenario som tar hänsyn till de mest troliga förändringarna i slutförvaret och dess omgivning,

- tillämpbarheten hos modeller, parametervärden och andra förutsättningar som används i analyserna,
- hantering av osäkerheter och känslighetsanalyser.
- Med avseende på analys av förhållanden efter förslutning kräver SKI beskrivning av utvecklingen i biosfären, geosfären och förvaret för de valda scenarierna.

SKI har även utfärdat Allmänna råd med avseende på tillämpning av SKIFS 2002:1. Där finns mera detaljerad information om till exempel klassificering av scenarier och osäkerheter.

1.5 Relaterade projekt

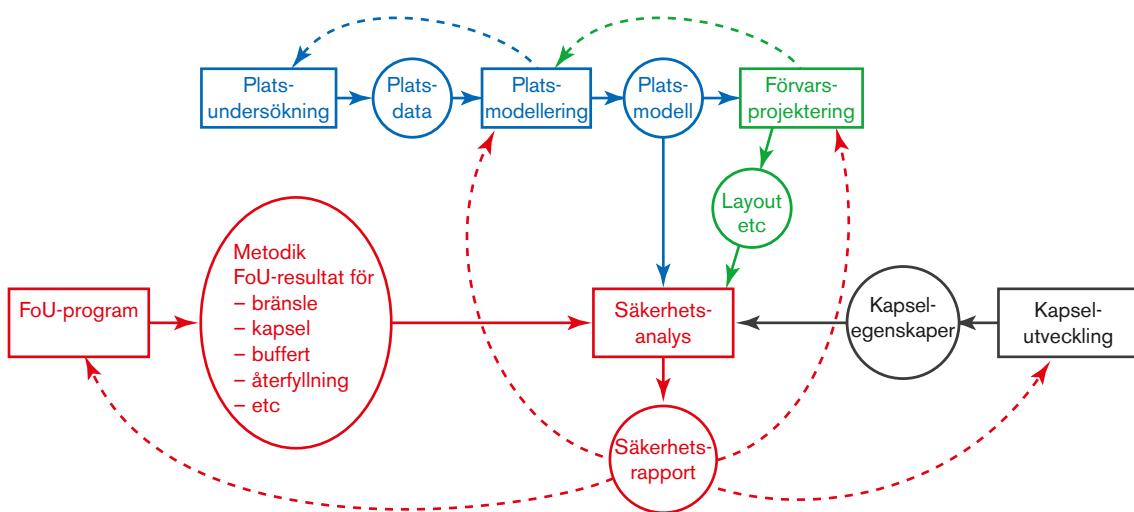
Säkerhetsanalysprojektet är nära kopplat till den pågående platsundersöknings- och projekteringsverksamheten vid SKB, se figur 1-3.

1.5.1 Platsundersökningar och platsmodellering

En stor del av grunden för säkerhetsanalyserna SR-Can och SR-Site ges av SKB:s pågående platsundersökningar vid Forsmark och Laxemar.

Fälldata från platsundersökningarna analyseras inom platsundersökningsprojektet, av en platsanalysgrupp som tar fram en serie platsbeskrivande modeller för geosfären och biosfären. Gruppen består av flera undergrupper som specialiseras sig på olika områden. Den platsbeskrivande modellen är en syntes av observationer av dagens tillstånd på platsen och av förståelse för tidigare och pågående processer, till exempel hydrogeologiska och geokemiska, som drivs av fenomen som landhöjning och klimatförändring. Modellsimuleringar av den historiska utvecklingen av platsen är en viktig del av syntesarbetet som utförs av platsanalysgruppen.

De platsbeskrivande modellerna ger dagens geosfär- och biosfär förhållanden som indata till säkerhetsanalysen. En mer detaljerad redovisning av detta ges i avsnitt 3.4.



Figur 1-3. Kopplingar till andra projekt. Verksamheter visas som rektanglar och produkter som ellipser. Som framgår av de streckade linjerna ger säkerhetsrapporten återkoppling till projekteringsgruppen vad gäller till exempel layoutfrågor och val av återfyllningsmaterial. Återkoppling till platsundersökningar, via platsmodellen, ges i form av ytterligare behov av platsmodellering och platsundersökning. Sistnämnda typ av återkoppling ges även av platsmodelleringssgruppen oberoende av säkerhetsanalysen. Återkoppling ges också från säkerhetsanalysen till SKB:s Fud-program och till arbetet med kapsel-utveckling.

Förutom att ge beskrivningar av det initiala tillståndet av geosfären och biosfären ger de platsbeskrivande modellerna förståelse för tidigare och pågående processer vid platsen. Denna information är avgörande för beskrivningen och modelleringen av den framtida utvecklingen av platsen och slutförvaret.

Resultaten av säkerhetsanalysen ger återkoppling till såväl ytterligare platsundersökningar som projekteringsarbete.

1.5.2 Förvarsprojektering

Projekteringsgruppen tar fram ett referensförvarskoncept som är praktiskt uppnåbart och som ska ge erforderliga säkerhetsfunktioner. Referenskonceptet inkluderar grundläggande dimensioneringar av anläggningarna liksom tekniska referenslösningar för buffert och återfyllning. Med hjälp av referenskonceptet och utgående från platsbeskrivningen tar projekteringsgruppen fram platsanpassade layouter av slutförvaret. Återkoppling ges till det vidare platsmodelleringsarbetet. De platsanpassade förvarslayouterna diskuteras närmare i avsnitt 3.4.4.

I bland föreslås olika projekteringsalternativ som underlag till säkerhetsanalysen, för att få återkoppling ur synvinkeln långsiktig säkerhet till vidare utveckling/val av alternativ. Bland sådana alternativ kan nämnas till exempel material för buffert och återfyllning av deponeringstunnlar i SR-Can.

1.5.3 Kapselutveckling

Som ett resultat av det omfattande inkapslingsprojektet söktes tillstånd enligt kärntekniklagen för en inkapslingsanläggning i november 2006. Inom detta projekt utvecklas och dokumenteras teknik för tillverkning och förslutning av kapslar. Projektet ger indata till SR-Can i form av kapsellegenskaper. En sammanfattning ges i avsnitt 3.3.2.

2 Problemet – bränslets farlighet

Avsnitten 2.1 till 2.6 är lätta bearbetningar av kapitel 3 i rapporten ”Använt kärnbränsle – hur farligt är det?”, SKB R-97-02. Avsnitt 2.7 bygger på materialet i avsnitt 2.4 i huvudrapporten SR-Can.

2.1 Inledning

I detta kapitel redogörs för hur farligheten för ett typiskt använt bränsle från ett svenska kärnkraftverk utvecklas sedan bränslet tagits ur drift. Beskrivningen är betydligt mer omfattande än den i säkerhetsrapporten SR-Can och det mesta av materialet är hämtat från SKB-rapporten R-97-02 med titeln ”Använt kärnbränsle – hur farligt är det?”. Syftet med den relativt fylliga framställningen är att ge icke-experten en gedigen introduktion till det problem som ett slutförvar för använt kärnbränsle är avsett att lösa, nämligen den risk som farligheten hos det använda bränslet utgör för människa och miljö om det inte hanteras på ett ansvarsfullt sätt.

Efter en beskrivning av några basfakta om radionuklidor görs en korta genomgång av de olika stegen i framställningen av kärnbränsle, från brytning av uranmalm till färdigt bränsle. Syftet är främst att visa vilken mängd uran i form av malm som går åt för att framställa en viss mängd bränsle. Radioaktiviteten och farligheten hos det använda bränslet kan sedan jämföras med värden för motsvarande mängd naturligt uran.

Farligheten hos bränslet kommer att avta med tiden och så småningom bli jämförbar med det naturliga uranets farlighet. Eftersom avsikten är att bränslet ska slutförvaras i urberget kommer man med tiden att nå en situation som påminner om den ursprungliga: ett radioaktivt material i urberget med en radioaktivitet och en farlighet jämförbara med det naturliga uranmaterial som ursprungligen bröts för att framställa bränslet.

Efter genomgången av kärnbränsleframställningen visas hur *radioaktiviteten* hos det använda bränslet utvecklas över tiden. Aktiviteten jämförs med den brutna malmens aktivitet. Även utvecklingen av resteffekten, det vill säga värmeförändringen till följd av det radioaktiva sönderfallet efter drift, diskuteras. För att beskriva *farligheten* hos bränslet måste radioaktiviteten kombineras med ett mått som beskriver strålningens skadeverkan. Detta görs i avsnitt 2.6. Även farligheten jämförs med det naturliga materialets farlighet.

2.2 Basfakta om radionuklidor

Allt materia består av atomer. Atomer har en kärna och ett omgivande ”moln” av elektroner. Kärnan består i huvudsak av protoner och neutroner. I naturen finns ett hundratal olika *grundämnen* eller *element*. Ett grundämne utmärks av att dess atomer har ett bestämt antal protoner i sina kärnor. Alla atomer av grundämnet syre har åtta protoner medan blyatomer har 82. Antalet neutroner hos kärnorna i ett och samma grundämne kan dock variera. En blyatom kan till exempel ha 124, 125 eller 126 neutroner i kärnan. Man säger att bly har flera olika *isotoper*. De tre isotoperna benämns bly-206, bly-207 respektive bly-208. Siffrorna i namnen anger summan av antalet protoner och neutroner i respektive isotops kärnor. Ordet *nuklid* används ofta som synonym för isotop.

De flesta isotoper eller nuklidor som förekommer i naturen är stabila. Ett litet antal har dock ett överskott av energi och strävar efter att göra sig av med överskottet genom radioaktivt sönderfall. Dessa isotoper benämns *radionuklidor*. Hastigheten med vilken en radionuklid

sönderfaller anges av dess *halveringstid*. Halveringstiden är den tid det tar för hälften av en ursprunglig mängd av radionukliden att sönderfalla. Efter en halveringstid återstår alltså hälften av den ursprungliga mängden, efter två halveringstider återstår en fjärdedel etc. Halveringstider kan variera från bråkdelar av sekunder till miljarder år. Två exempel på radionuklider som finns i naturen är uran-238 och uran-235 med halveringstiderna 4,5 respektive 0,7 miljarder år.

Vid nästan alla sönderfall utsänds antingen *alfa- eller betapartiklar*. Alfapartiklar är positivt laddade och består av två protoner och två neutroner från den sönderfallande kärnan. Betapartiklar är energirika negativt laddade elektroner som den sönderfallande kärnan sänder ut samtidigt som en neutron i kärnan omvandlas till en proton. Vid både alfa- och betasönderfall utsänds dessutom *gammastrålning* som till sin karaktär liknar röntgenstrålning.

Uran och vissa andra tunga radionuklider sönderfaller i flera steg i så kallade *sönderfallskedjor*. Sönderfallskedjan som börjar med uran-238 visas i figur 2-1. För de tunga nukliderna finns fyra olika sådana kedjor. Tre slutar med att stabilt bly bildas, den fjärde med bildning av stabil vismut.

Radioaktivitet mäts i enheten *Becquerel* (Bq). En Becquerel är lika med ett sönderfall per sekund.

En människa som träffas av strålning utsätts för en *stråldos*. Stråldoser mäts i enheten *Sievert* (Sv). Begreppet stråldos förklaras närmare i avsnitt 2.6.

Uran-238	4,5 miljarder år
↓ α	
Torium-234	24 dagar
↓ β	
Protaktinium-234	1,2 minuter
↓ β	
Uran-234	246 000 år
↓ α	
Torium-230	75 400 år
↓ α	
Radium-226	1 600 år
↓ α	
Radon-222	3,8 dagar
↓ α	
Polonium-218	3,1 minuter
↓ α	
Bly-214	27 minuter
↓ β	
Vismut-214	20 minuter
↓ β	
Polonium-214	163 mikrosekunder
↓ α	
Bly-210	22 år
↓ β	
Vismut-210	5 dagar
↓ β	
Polonium-210	138 dagar
↓ α	
Bly-206	Stabil

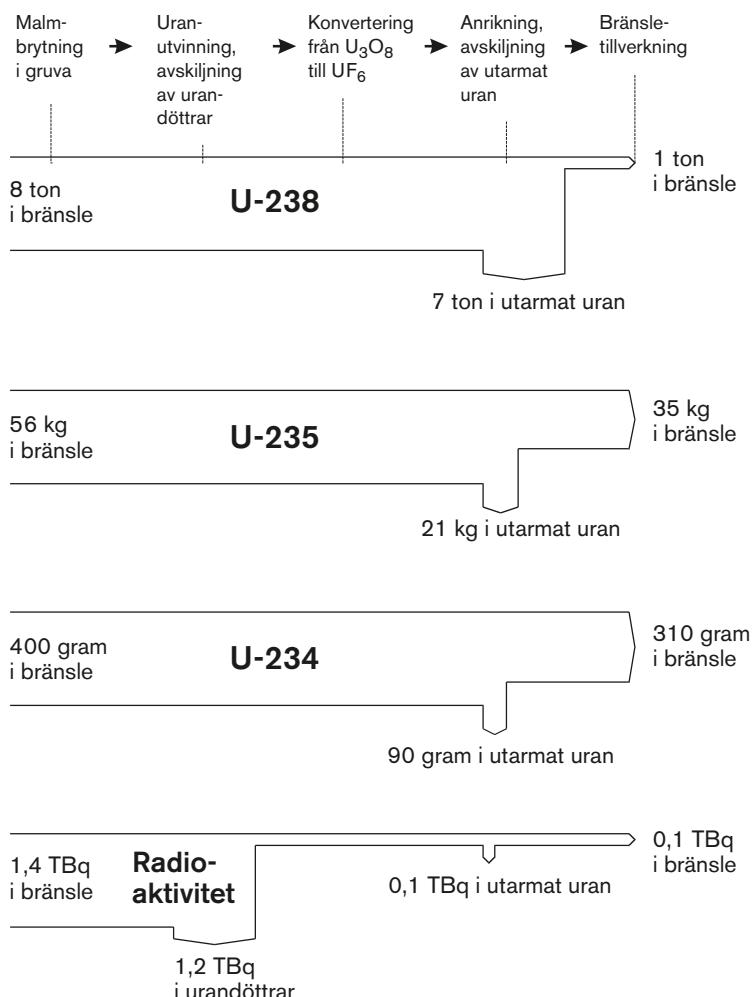
Figur 2-1. Uran-238 omvandlas genom naturligt sönderfall i en rad steg till bly. Halveringstiderna för ingående nuklider finns angivna liksom typen av sönderfall, α eller β.

2.3 Framställning av kärnbränsle

Kärnbränsle framställs ur uranmalm i en rad steg från brytning av uranmalm till tillverkning av bränslelement i en bränslefabrik. De radioaktiva ämnena i uranmineral utgörs av uranisotoperna uran-235 och uran-238 samt av urandöttrar, det vill säga de radioaktiva ämnena som bildas vid uranets sönderfall. Samtliga döttrar sönderfaller betydligt snabbare än uran och skulle inte finnas kvar i naturen om de inte ständigt bildades genom uranets sönderfall.

De olika stegen i framställningen av kärnbränsle beskrivs i figur 2-2 och är i korthet följande:

1. Brytning av uranmalm under jord eller i dagbrott. De radioaktiva komponenterna i malmen är uran-238, uran-235 samt urandöttrar. Uraninnehållet utgörs typiskt till 99,3 procent av uran-238 och till 0,7 procent av uran-235. Dessutom finns cirka 0,005 procent uran-234 som är en sönderfallsprodukt av uran-238. Urandöttrarna är totalt sett mer radioaktiva än uranet.
2. Utvinning av uran i form av en uranoxid, U_3O_8 , ur malmen. Detta sker i ett uranverk, ofta i anslutning till gruvan. I detta steg avskiljs urandöttrarna som avfall. Avfallet återförs till gruvan eller deponeras på marknivå.
3. Konvertering av U_3O_8 till uranhexafluorid, UF_6 . Detta görs för att UF_6 är en kemisk form av uran som lämpar sig för anrikning, nästa steg i processen.



Figur 2-2. Framställning av kärnbränsle. En viss mängd malm innehåller 8 ton uran-238. Uranet delas i de olika stegen grovt upp i 1 ton anrikat uran (kärnbränsle), och 7 ton utarmat uran. Isotoperna uran-235 och uran-234 svarar för små delar av massorna i de olika fraktionerna. Urandöttrarna som avskiljs i uranverket innehåller det mesta av den radioaktiviteten som ursprungligen fanns i malmen.

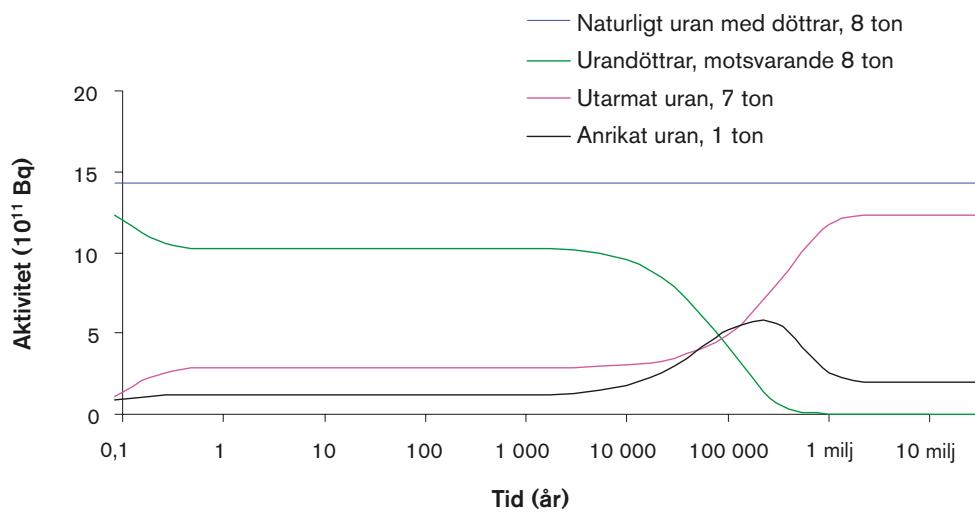
- Anrikning av isotopen uran-235. Det är uran-235 som används som bränsle i en kärnkraftsreaktor och man vill därför höja halten av uran-235 genom anrikning. Halten uran-238 höjs typiskt från 0,7 procent till 3,5 procent vid anrikningen. Anrikningsprocessens natur gör att även halten av uran-234 höjs till cirka 0,031 procent. Resterna, det så kallade utarmade uranet, kan i framtiden antingen utnyttjas för ytterligare energiproduktion eller betraktas som avfall. Det utarmade uranet består typiskt av 0,0013 procent uran-234, 0,3 procent uran-235 och 99,7 procent uran-238. Med dessa halter ger 8 ton naturligt uran upphov till 1 ton anrikat och 7 ton utarmat uran, allt i form av uranhexasfluorid.
- Tillverkning av bränslelement. I en bränslefabrik omvandlas den anrikade uranhexasfluoriden till pulverformig urandioxid, UO_2 . Pulvret pressas till cylinderformade kutsar som sätts samman till bränslestavar. Kutsarna har en keramisk, porslinsliknande, struktur.

Syftet med beskrivningen ovan, och i figur 2-2, är att ge en grov överblick av de större mass- och aktivitetsflödena för radioaktiva element i de olika leden. Beskrivningen ger inte någon detaljerad bild av exempelvis de mindre utsläpp av radioaktivitet till vatten och luft som förekommer i olika processer.

Vad gäller radioaktiva ämnen kan man något förenklat beskriva situationen så att det radioaktiva innehållet i uranmineralet genom de olika processerna kommit att delas upp i de tre fraktionerna urandöttrar samt utarmat och anrikat uran.

Av 8 ton bruten uran i uranmalm blir alltså 1 ton bränsle, återstående 7 ton avskiljs vid anrikningen som utarmat uran. Av den radioaktivitet som ursprungligen fanns i malmen återfinns det mesta hos de urandöttrarna som avskiljs i uranverket. Övrig aktivitet finns i det utarmade och det anrikade uranet.

Figur 2-3 visar hur radioaktiviteten utvecklas i tiden för urandöttrarna respektive för utarmat uran. För fullständigheten har även det anrikade uranet tagits med. Summan av radioaktiviteterna hos det utarmade och det anrikade uranet samt hos de avskilda urandöttrarna är vid varje tidpunkt lika med aktiviteten för motsvarande mängd uranmalm. Även denna aktivitetsnivå, som är i det närmaste konstant i miljarder år, visas i figuren.



Figur 2-3. Aktivitetens utveckling hos de olika fraktionerna i figur 2-2. Under nästan 100 000 år svarar urandöttrarna för den huvudsakliga aktiviteten. Det utarmade uranets aktivitet ökar med tiden i takt med att uranet sönderfaller och nya radioaktiva dotterprodukter bildas. Aktiviteten för anrikat uran upptar ett maximum kring 100 000 år. Uppgången beror på bildning av dotterprodukter i första hand vid sönderfall av uran-234 som anrikats kraftigt. Uran-234 har en halveringstid på 246 000 år vilket gör att aktiviteten avtar efter denna tid.

Figur 2-3 visar en delvis orealistisk utveckling. Det anrikade uranet är ju avsett att användas som bränsle i en reaktor. Därigenom kommer dess radioaktivitet att öka kraftigt och gå en helt annan utveckling till mötes än vad som visas i figuren. Detta behandlas i nästa avsnitt.

2.4 Radioaktivitet hos använt kärnbränsle

Vid driften i en kärnkraftreaktor klyvs kärnorna av uranisotopen uran-235 i en så kallad fissionsprocess. Nya radioaktiva ämnen bildas under driften, och radioaktiviteten har efter drift ökat kraftigt, se avsnitt 2.4.1 nedan. De flesta radioaktiva ämnen har mycket kort halveringstid men även betydande mängder långlivade ämnen bildas. Detta gör att det använda bränslet måste hanteras på ett säkert sätt under avsevärda tider.

Det detaljerade innehållet av radionuklidor hos använt kärnbränsle beror av bränsletyp och de förhållanden som rått under driften. För mängderna av långlivade ämnen är *utbränningsgraden*, det vill säga den totala energi som utvunnits ur varje bränsleenhet, speciellt betydelsefull. För ämnen som är kortlivade i jämförelse med bränslets drifttid har den *specifika effekten*, det vill säga den energi som varje sekund utvinns ur varje bränslelement under drift, större betydelse. För diskussionen i denna rapport har bränsletyp och driftförhållanden valts för att illustrera typiska förhållanden för det svenska kärnkraftprogrammet.

Den bränsletyp som valts för presentationen är av typ SVEA 64 avsett för så kallad kokarvattenreaktorer, den vanligaste typen av reaktor i Sverige. Bildandet av radionuklidor under drift har datorsimulerats med utbränningsgraden 38 MWdygn/kg uran och en specifik effekt av 23,8 kW/kg uran. Simuleringen har resulterat i ett beräknat innehåll av radionuklidor omedelbart efter drift. Detta så kallade radionuklidinventarium har använts som utgångspunkt för beräkningar av inventariets senare utveckling.

Ett innehåll av radionuklidor redovisas vanligen i form av radioaktivitet. Man anger alltså inte direkt mängden radionuklidor (i kg eller m³) utan den radioaktivitet som dessa ger upphov till i enheten Becquerel (sönderfall per sekund).

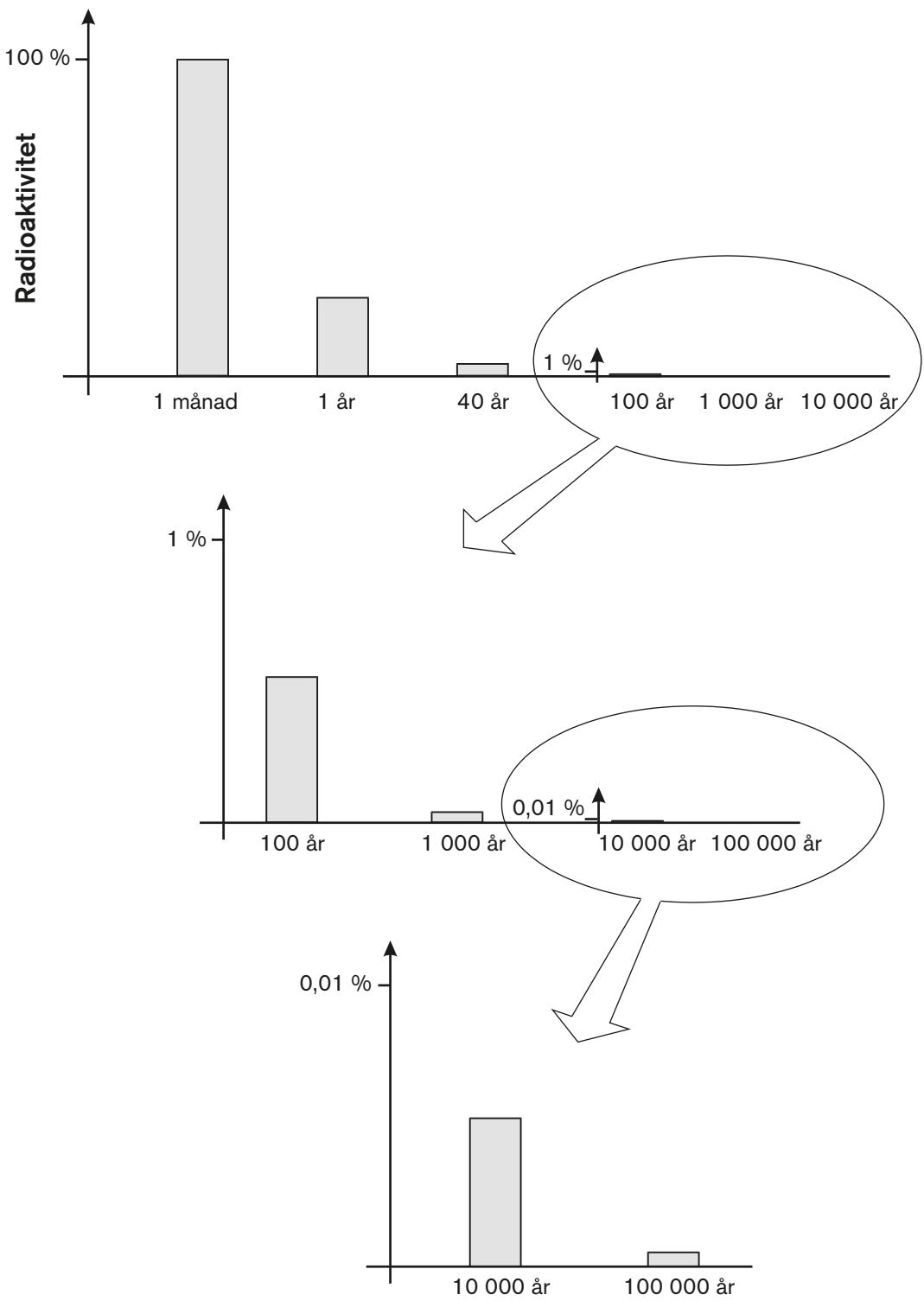
I figur 2-4 visas radioaktivitetens utveckling i tiden från cirka en månad efter att bränslet tagits ur drift. För att illustrera hur aktivitet avtar på lång sikt har figuren delats upp i tre delar med olika aktivitetsskalor.

2.4.1 Fissions- och aktiveringsprodukter samt aktinider

Man kan grovt skilja mellan två typer av radionuklidor i det använda bränslet: fissions- och aktiveringsprodukter samt aktinider.

Fissionsprodukter är de nya ämnen som bildas då tunga atomkärnor, till exempel uran eller plutonium, klyvs i fissionsprocessen i kärnreaktorn. Exempel på fissionsprodukter är jod (I-129, I-131), cesium (Cs-134, Cs-135, Cs-137) och strontium (Sr-90). *Aktiveringsprodukter* uppkommer genom att elektriskt neutrala partiklar, neutroner, som bildas i fissionsprocessen tas upp av olika material, främst metaller, i bränslelementet. Dessa ämnen kan därigenom bli radioaktiva. Kobolt, nickel och niob är exempel på ämnen som aktiveras på detta sätt.

Aktiniderna utgörs dels av uranet i bränslet, dels av de ämnen som bildas då uran tar upp en eller flera neutroner utan att klyvas. Dessa ämnen, som genom neutronupptaget blir tyngre än uran, kallas transuraner och det viktigaste är plutonium (plutonium-238, -239, -240, -241 med flera). Såväl uran som transuraner är radioaktiva och sönderfaller i flera steg i sönderfallskedjor, se avsnitt 3.1.1. Mängden av radionukliderna i kedjornas senare steg kan härigenom öka med tiden även efter att bränslet tagits ur drift. Fenomenet kallas *inväxt*. Ett viktigt exempel på inväxt i användt bränsle är bildningen av americium-241 genom β-sönderfall av plutonium-241.



Figur 2-4. Radioaktiviteten hos ett ton använt kärnbränsle av typ SVEA 64 med en utbränningsgrad av 38 MWd/g kg U. För att illustrera hur radioaktiviteten avtar i längre tidsperspektiv har figuren delats i tre delar med olika aktivitetsskalor. (Nivån 100 procent på den översta delen svarar mot en aktivitet av $3,35 \cdot 10^{17}$ Becquerel.)

Figur 2-5 visar radioaktivitetens utveckling i tiden för bränslet med logaritmiska skalar för att längre tidsperspektiv ska kunna överblickas. Dessutom redovisas hur den totala aktiviteten fördelar sig på fissionsprodukter och aktinider. Av figuren framgår att aktiviteten domineras av fissions- och aktiveringsprodukter under de inledande 100 åren medan aktinider och aktiniddöttrar är klart dominanterande för tider över cirka 500 år.

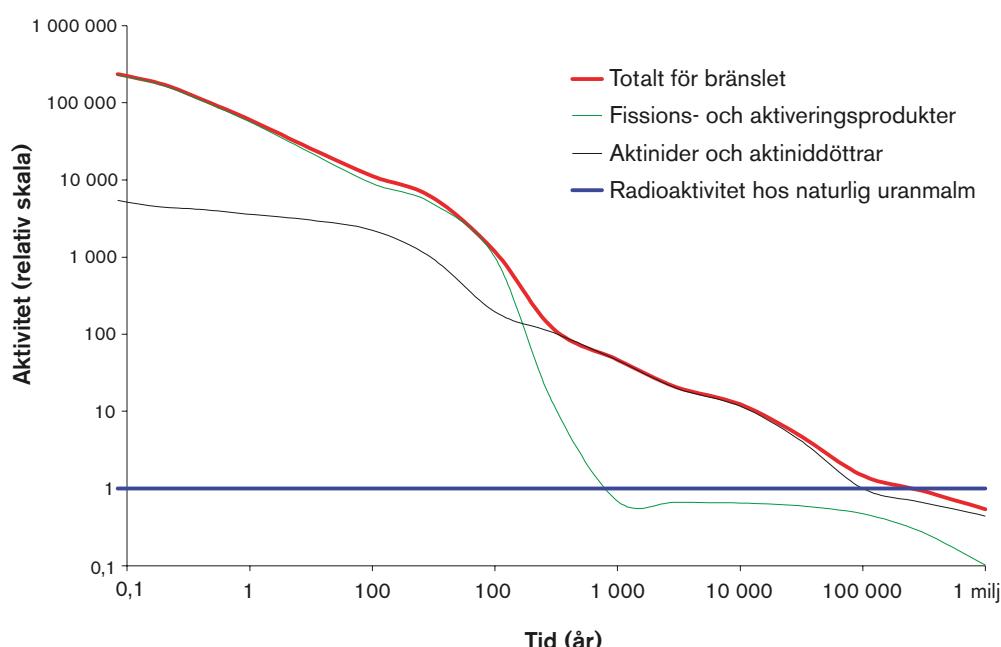
Det använda bränslet kommer i ett långt tidsperspektiv alltmer att likna det mineral som ursprungligen bröts för att framställa bränslet allt eftersom de radioaktiva ämnen som bildas vid driften sönderfaller. Kvar blir de naturligt förekommande uranisotoperna uran-238 och uran-235 med halveringstiderna 4,5 respektive 0,7 miljarder år. Även de naturligt förekommande dotterprodukterna som ständigt bildas genom uranisotopernas kedjesönderfall kommer att finnas kvar i det använda bränslet på mycket lång sikt.

2.4.2 Jämförelse mellan mineral och bränslecykels fraktioner

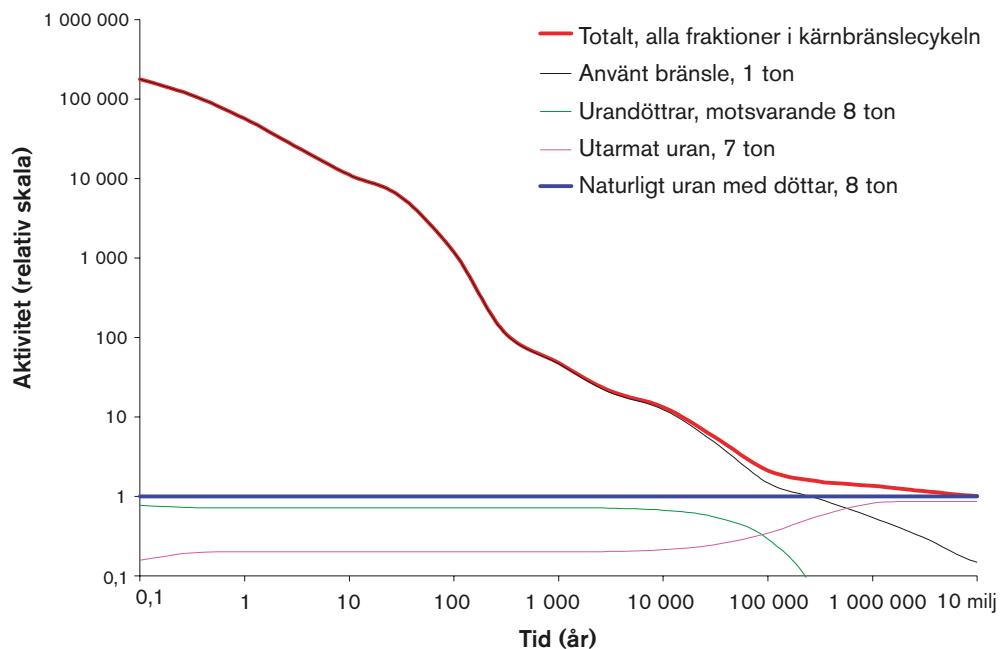
Betrakta för ett ögonblick återigen figur 2-3, som visar aktiviteterna för de olika fraktionerna i bränsleframställningen. Det kan vara intressant att ersätta kurvan för det anrikade uranet med den för det använda bränslet. Detta görs i figur 2-6 där dessutom skalan för aktiviteten gjorts logaritmisk för att täcka in det stora spannet av aktiviteter som presenteras i figuren. Man kan nu jämföra radioaktiviteten för två situationer:

- Mineralet lämnas obrutet i urangruvan.
- Malmen bryts, uranet avskiljs, anrikas och används som bränsle.

Hur ser de totala aktiviteterna ut i de olika fallen? I fall a (blå linje) är som framgått (figur 2-3) aktiviteten i det närmaste konstant under tider som är jämförbara med halveringstiden hos uran-238 (4,5 miljarder år). I fall b (röd linje) är aktiviteten från början betydligt högre och avtar stadigt i cirka 100 000 år. Vid den tiden har aktiviteten sjunkit till ett värde nära fall a. Under dessa 100 000 år domineras aktiviteten i fall b helt av bidraget från använt bränsle. Efter 100 000 år avtar aktiviteten långsammare och ligger hela tiden i närheten av fall a.



Figur 2-5. Relativ aktivitet för använt kärnbränsle av typ SVEA 64 med en utbränningsgrad av 38 MWd/kg U. Aktiviteten domineras under de inledande drygt 100 åren av fissionsprodukter, därefter av aktinider.



Figur 2-6. Radioaktiviteten för uranmineral (blå linje) samt samtliga fraktioner som uppkommer då samma mängd uranmineral används i kärnbränslecykeln (röd linje). De olika fraktionerna utgörs av det använda bränslet, det utarmade uranet och de urandöttrar som avskiljs i uranverket.

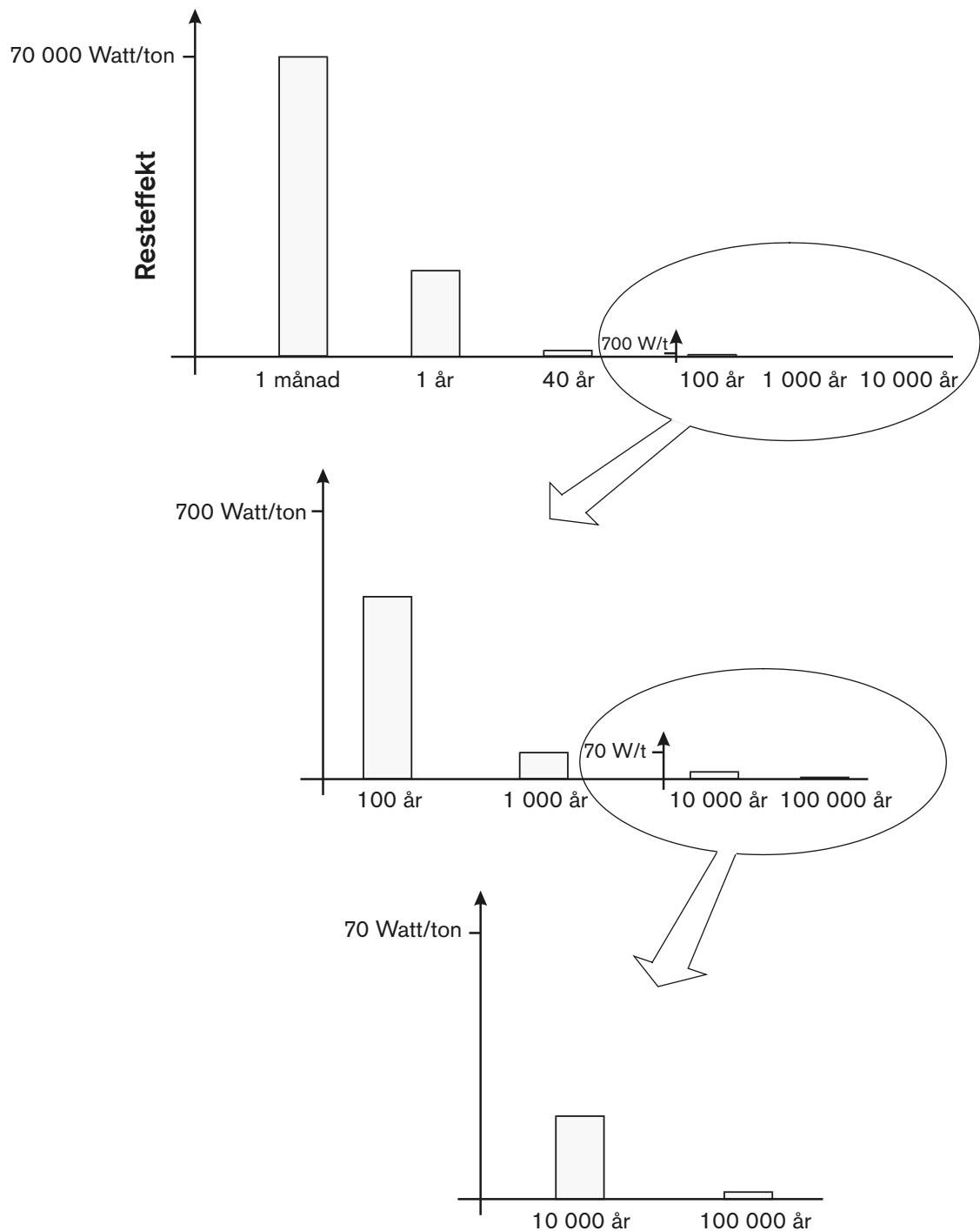
Kärnbränslecykeln ger alltså totalt sett upphov till betydligt förhöjd radioaktivitet under cirka 100 000 år. För att diskutera vilka risker detta innebär behöver man dels ha klart för sig hur aktiviteten omsätts i farlighet, dels vilken tillgänglighet de radionuklidor har som svarar för aktivitet och farlighet på lång sikt.

2.5 Resteffekt hos använt kärnbränsle

Vid de radioaktiva sönderfallen i det använda bränslet frigörs energi som ger en värmeutveckling i avfallet. Det är viktigt att känna till omfattningen av värmeutvecklingen eftersom förhödda temperaturer påskyndar kemiska och andra förlopp, till exempel vid slutförvaring av använt bränsle.

Värmeutvecklingen i bränslet efter drift brukar benämñas *resteffekt*. Figur 2-7 visar hur resteffekten för ett ton använt kärnbränsle avtar med tiden.

Då bränslet ska slutförvaras efter cirka 30 år utvecklas en effekt av drygt 800 Watt per ton bränsle, vilket är jämförbart med ett ordinärt värmeelement eller en kraftig brödrost. Effekten fortsätter därefter att sjunka enligt figur 2-7.



Figur 2-7. Resteffekt för 1 ton använt kärnbränsle av typ SVEA 64 med en utbränninggrad av 38 MWd/kg U.

2.6 Hur skadar strålningen människan?

2.6.1 Allmänt om farlighet hos strålning

Strålning från radioaktiva material är farlig för levande organismer eftersom den förmår skada eller döda biologiska celler. För människan kan höga stråldoser under kort tid leda till döden på grund av skador på bland annat centrala nervsystemet, matsmältningsorganen eller benmärgen. Om doserna är mycket höga kan döden inträda omedelbart. Lägre stråldoser kan framför allt orsaka cancer och skador på arvsmassan.

Stråldoser till människa mäts i enheten Sievert (Sv). Enheten är ett mått på skadeverkan i kroppens celler, där man också tagit hänsyn till att vissa organ är mer känsliga än andra. Vi omges ständigt av en naturlig bakgrundssstrålning. Den är i Sverige av storleksordningen en tusendels Sievert per år, 1 mSv/år. Dessutom utsätts vi för strålning vid behandlingar inom sjukvården och av radon i bostäder. Dessa doser varierar mycket från person till person. I medeltal utsätts svensk för cirka 4 mSv/år om man summerar dessa tre huvudsakliga källor.

En dödlig stråldos är cirka 5 000 mSv om den erhålls vid ett och samma tillfälle. Människor har utsatts för direkt dödliga doser bara vid mycket extrema situationer som atombombfallningarna i Japan under andra världskriget och vid släckningsarbetet efter kärnkraftshaveriet i Tjernobyl.

Vilken stråldos krävs för att orsaka cancer? Detta är ett omtvistat problem. Bland annat är det inte klarlagt om sannolikheten att drabbas av cancer står i direkt proportion till dosens storlek när det gäller små doser. Experimentella observationer finns bara för relativt höga doser, hundratals mSv och uppåt. Olika nationella och internationella organ och myndigheter som sysslar med strålskyddsfrågor använder vanligen uppskattningen att sannolikheten att drabbas av en dödlig cancer är *ungefär fem procent om man utsätts för en stråldos av 1 000 mSv*.

Vad gäller för lägre doser? Här finns inga direkta observationer i verkligheten att luta sig mot. Vanligen antas att sannolikheten för cancer är proportionell mot dosen ända ner till mycket små doser. Dosen 100 mSv skulle då antas ge sannolikheten 0,5 procent för en dödlig cancer, dosen 10 mSv 0,05 procent etc.

Antagandet om proportionalitet mellan dos och sannolikhet för cancer kallas ofta för den *linjära hypotesen*. Den är också utgångspunkten för omräkning av dos till risk i säkerhetsanalysen i enlighet med SSI:s föreskrifter.

Alfa-, beta-, gamma- och neutronstrålning

Då man mäter radioaktivitet mäts antalet sönderfall per sekund och man gör ingen skillnad mellan olika typer av strålning. För att diskutera strålningens farlighet måste man även ta hänsyn till vilken typ av strålning det rör sig om.

Nästan alla radionuklidor i använt kärnbränsle omvandlas genom antingen alfa- eller betasönderfall. Då en atomkärna genomgår alfasönderfall utsänds positivt laddade partiklar som består av två protoner och två neutroner. Vid betasönderfall utsänds elektroner som är negativt laddade. Vid såväl alfa- som betasönderfall avges dessutom ofta gammastrålning som till sin karaktär liknar röntgenstrålning.

Ett fåtal ämnen i det använda bränslet ger dessutom upphov till neutronstrålning då de sönderfaller. Neutroner är elektriskt neutrala partiklar som förekommer i alla atomkärnor utom i väte.

Extern och intern bestrålning

Den stråldos som en given typ av strålning ger upphov till i människokroppen är starkt beroende av om strålningen avges utanför eller inuti kroppen. Man skiljer därför mellan *extern* och *intern* bestrålning.

Endast gamma- och neutronstrålning förmår i någon högre utsträckning tränga in i kroppen. Alfastrålning stoppas av de yttersta hudlagren medan betastrålning kan tränga in någon centimeter. Om alfa- eller betastrålande ämnen kommer in i kroppen, till exempel genom inandning eller via födan, är deras skadeverkan desto större.

Den externa strålningen man kan utsättas för från använt kärnbränsle domineras därför helt av gamma- och neutronstrålning. Vad gäller internstrålning är det framför allt alfa- och betastrålning man behöver skydda sig mot.

Farlighet hos några naturligt förkommende isotoper

I naturen finns radioaktiva mineral av ämnena uran och torium. Som framgått av avsnitt 3.1.1 sönderfaller dessa ämnen i flera steg där radioaktiva dotterprodukter bildas. Det är framför allt vissa av dotterprodukterna (radium, radon, bly, polonium med flera) som är farliga i mineralen. Farligheten hos rent uran och torium är lägre eftersom de har mycket långa halveringstider, det vill säga en låg aktivitet.

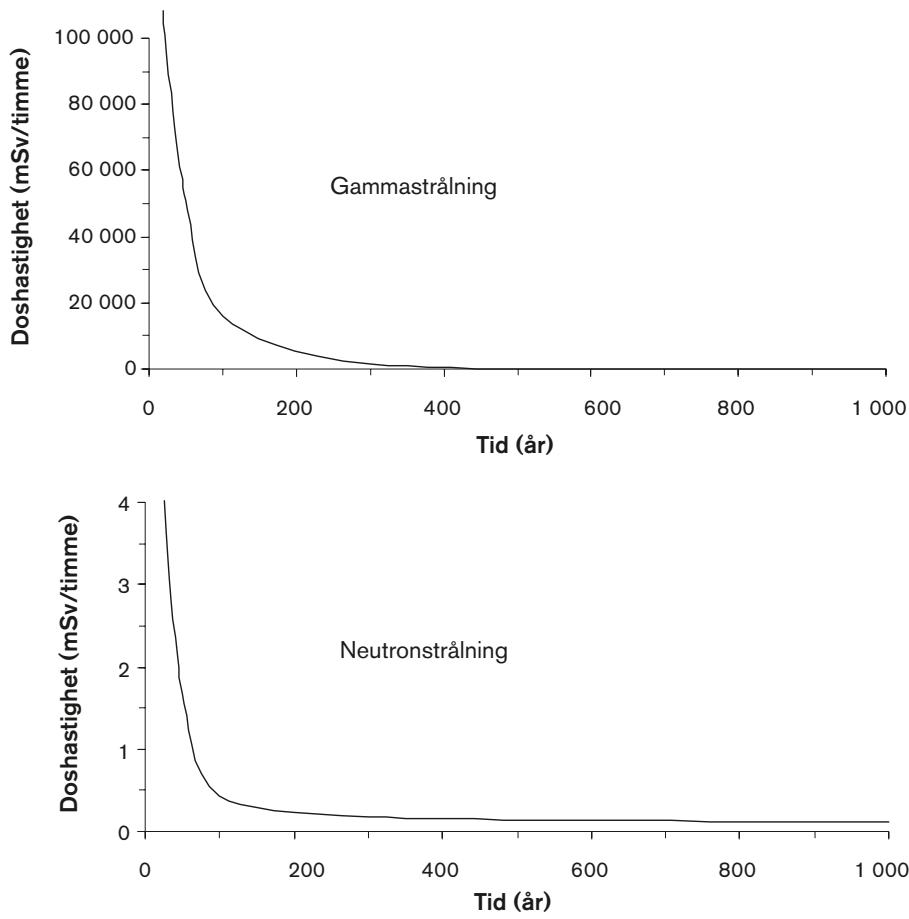
Den radioaktiva gasen radon bildas vid sönderfall av uran och torium. Isotopen radon-222 bildas i sönderfallskedjan som startar med uran-238, se figur 2-1. Radon-220 bildas vid sönderfall av torium-232. Radon och dess dotterprodukter kan, om de kommer in i lungan, fastna där och genom sin radioaktivitet orsaka lungcancer. Radon utgör en strålningsrisk bland annat i gruvor och särskilt i kombination med rökning. Även vissa bostadshus kan ha så höga halter av radon i inomhusluften att strålskyddsmyndigheterna rekommenderar åtgärder.

Radium-226 bildas vid sönderfall av uran-238 (figur 2-1). Radium söker sig, om det kommer in i kroppen, till benmärgen och kan där orsaka en cancerform som kallas bensarkom. Detta har bland annat drabbat personer som arbetat med radiumfärg, som tidigare användes till exempel till självljande siffror och visare i armbandsur.

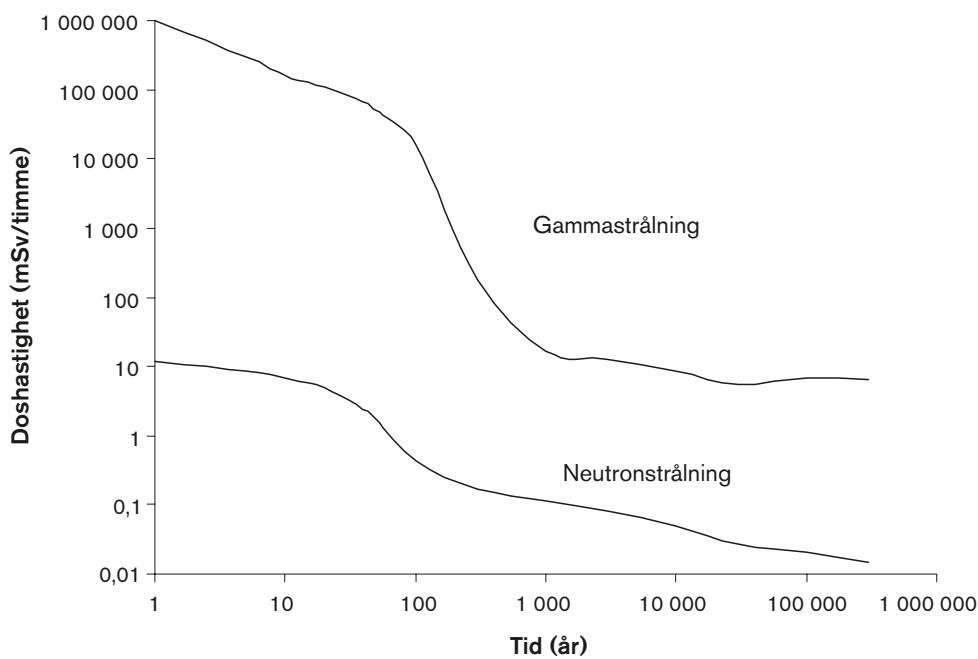
2.6.2 Externbestrålning

Externbestrålning anges ofta som en doshastighet. Doshastigheten talar om hur stor dos man utsätts för om man vistas en bestämd tid i närheten av en strålkälla och uttrycks ofta i enheten mSv/timme.

Figur 2-8a och b visar den externa stråldos man utsätts för på en meters avstånd från ett ton använt kärnbränsle. Bidraget från såväl gamma- som neutronstrålning vid olika tider efter drift framgår. Ungefär ett år efter att bränslet tagits ur drift är doshastigheten omkring 1 000 000 mSv/timme. Detta betyder att man utsätts för en dödlig dos, cirka 5 000 mSv, på cirka 20 sekunder. Dosen domineras helt av bidraget från gammastrålningen. Med tiden avtar strålningen men även efter cirka 30 år, det vill säga vid den tid då det är meningen att det använda bränslet ska slutförvaras är doshastigheten så hög som cirka 65 000 mSv/timme. Det krävs alltså skyddsåtgärder mot externstrålning vid all hantering av använt kärnbränsle, från uttaget ur reaktorn till den slutliga förvaringen. Också på mycket lång sikt är strålningen nära oskyddat använt bränsle avsevärd. Av figur 2-8 framgår även att dosen från neutronstrålningen alltid är avsevärt mindre än den från gammastrålningen, men att neutronstrålningen avtar långsammare.



Figur 2-8a. Dos hastigheten på 1 meters avstånd från ett ton använt kärnbränsle vid olika tidpunkter efter att det tagits ur drift. Samma data med logaritmiska axlar, där längre tidsperioder kan överblickas visas i figur 2-8b.



Figur 2-8b. Samma data som figur 2-8a men med logaritmiska axlar för att längre tidsperioder ska kunna överblickas.

2.6.3 Internstrålning

Hur farligt är ett radioaktivt ämne om man får det i sig? Den radiologiska farligheten beror av tre faktorer:

- mängden av ämnet,
- radionuklidernas sönderfallshastighet,
- skadeverkan i kroppen vid sönderfallen.

Den tredje faktorn, skadeverkan vid internstrålning, anges i allmänhet som den stråldos en bestämd aktivitet, 1 Becquerel, av ett ämne ger upphov till om det kommer in i kroppen. Farligheten anges för varje radionuklid av en så kallad dosfaktor i enheten Sievert/Becquerel, Sv/Bq. Dosfaktorerna tar hänsyn till att olika ämnen sprids och ibland lagras på olika sätt i kroppen.

Spridningsvägarna för ämnet i kroppen och därmed dess skadeverkan beror bland annat på om ämnet inandas eller kommit in via födan. Man arbetar därför med två olika uppsättningar av dosfaktorer, en för inandning och en för intag via föda. De flesta radionuklidor är farligare om de inandas jämfört med om de kommer in i kroppen via födan.

Farlighet vid intag via födan

Figur 2-9 visar farligheten för använt bränsle vid olika tidpunkter efter drift. Farligheten avser intag via föda. Staplarnas höjd är ett mått på farligheten och det framgår även vilka ämnen som domineras vid olika tidpunkter. Figuren har delats upp i tre delar med olika skalor för olika tidsperioder eftersom farligheten avtar kraftigt med tiden. Alla farlighetsmått är i procent av den totala farligheten en månad efter drift, den första stapeln i figuren.

För korta tider domineras kortlivade nuklidor farligheten. Dessa ämnen har, just på grund av att de är kortlivade, en hög aktivitet. De måste ju ”hinna” sönderfalla på kort tid och radioaktiviteten under den korta livslängden blir därför med nödvändighet hög. Därmed blir även farligheten i allmänhet högre eftersom den beror direkt på aktiviteten.

I takt med att kortlivade isotoper försvinner kommer farligheten att domineras av mer långlivade ämnen. Dessa har ju hela tiden funnits i bränslet, men utgjort en mindre del av den totala farligheten vid tider då kortlivade nuklidor domineras. Efter 10 000 år utgörs till exempel farligheten till cirka hälften av plutoniumisotopen plutonium-239 med halveringstiden 24 000 år. Mer än 75 procent av den ursprungliga mängden plutonium-239 finns kvar efter 10 000 år. Farligheten orsakad av plutonium-239 har alltså varit nästan oförändrad under 10 000 år men har för korta tider endast utgjort en bråkdel av den totala farligheten.

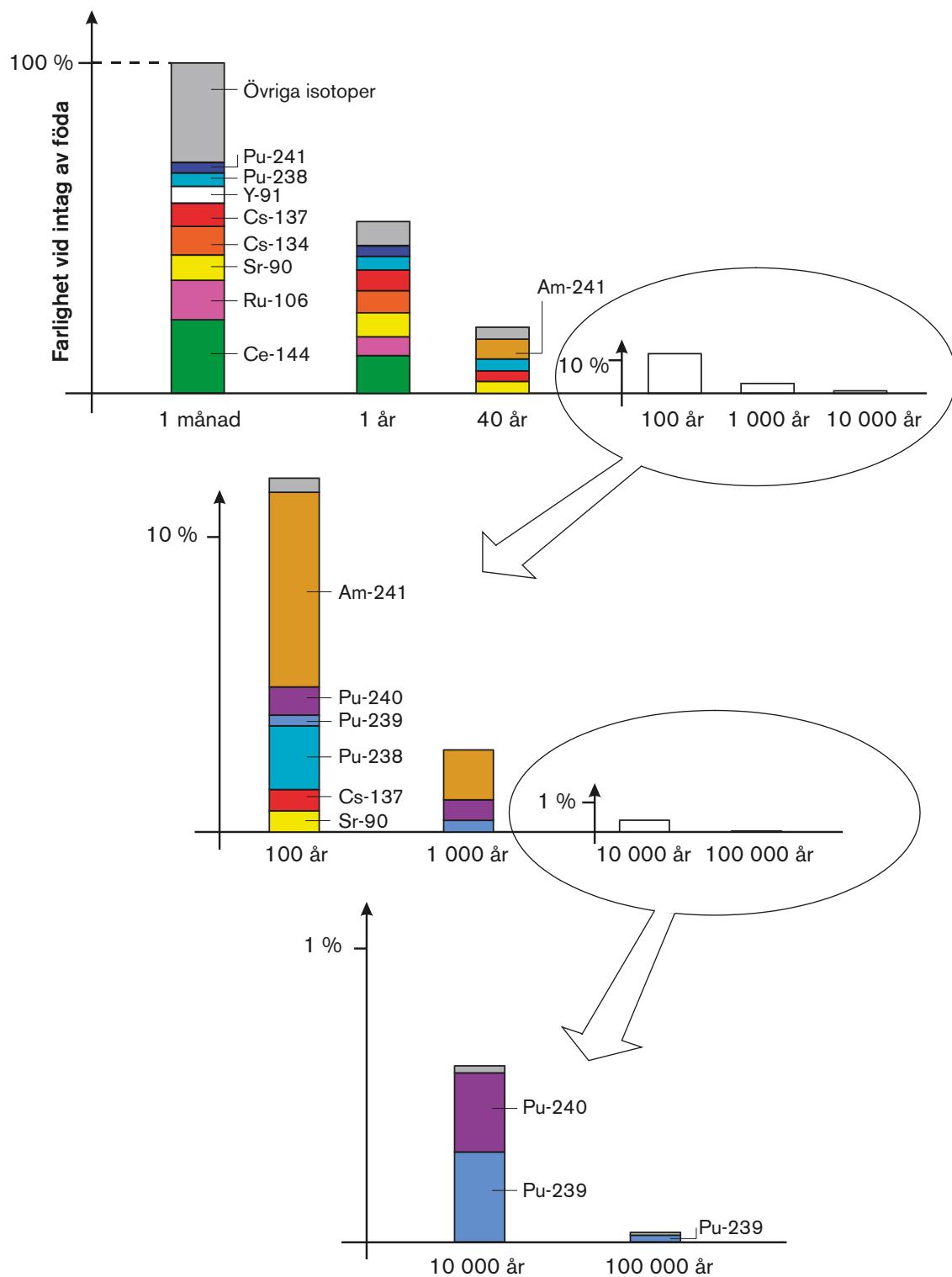
Farlighet vid inandning

I figur 2-10 visas hur farligheten vid inandning utvecklas med tiden. Liksom i en del tidigare figurer relateras farligheten hos det använda bränslet till farligheten för den mängd uranmalm som ursprungligen bröts för att framställa bränslet. Farligheten vid inandning domineras helt av aktinider och aktiniddöttrar.

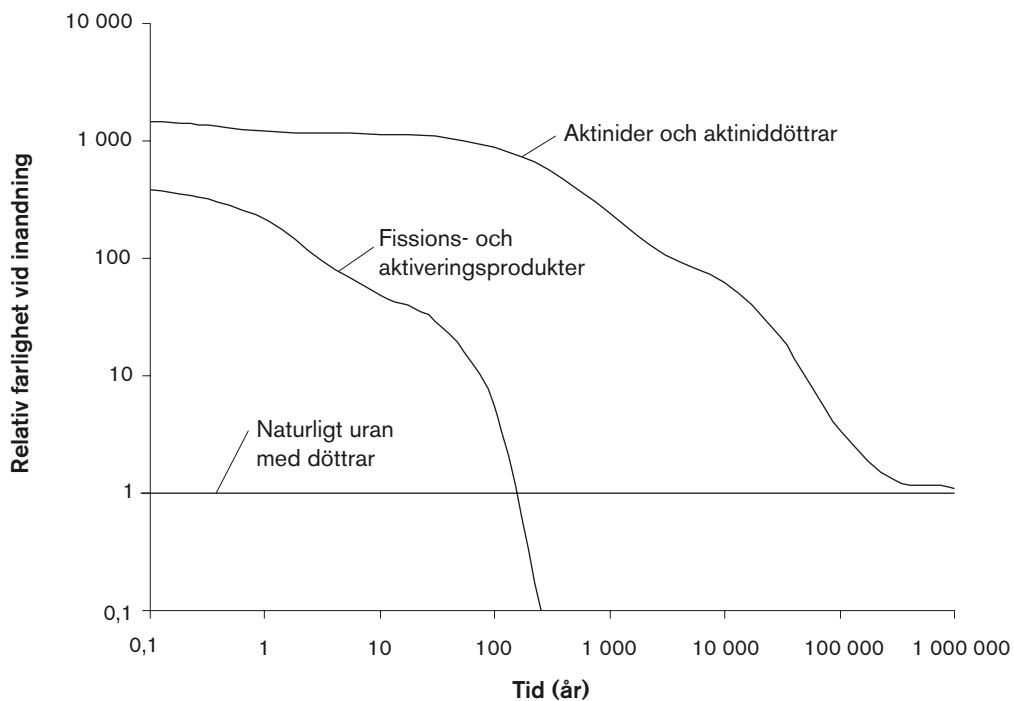
2.6.4 Jämförelse mellan mineral och bränslecykelns fraktioner

I avsnitt 2.4.2 jämfördes radioaktiviteten för den mängd malm som går åt för att framställa 1 ton bränsle med summan av radioaktiviteterna i alla fraktioner i kärnbränslecykeln. Motsvarande jämförelse med avseende på farlighet görs i figur 2-11. Även farligheten hos summan av fraktionerna i kärnbränslecykeln har nått ner till nivåerna för malmen efter ungefär 100 000 år.

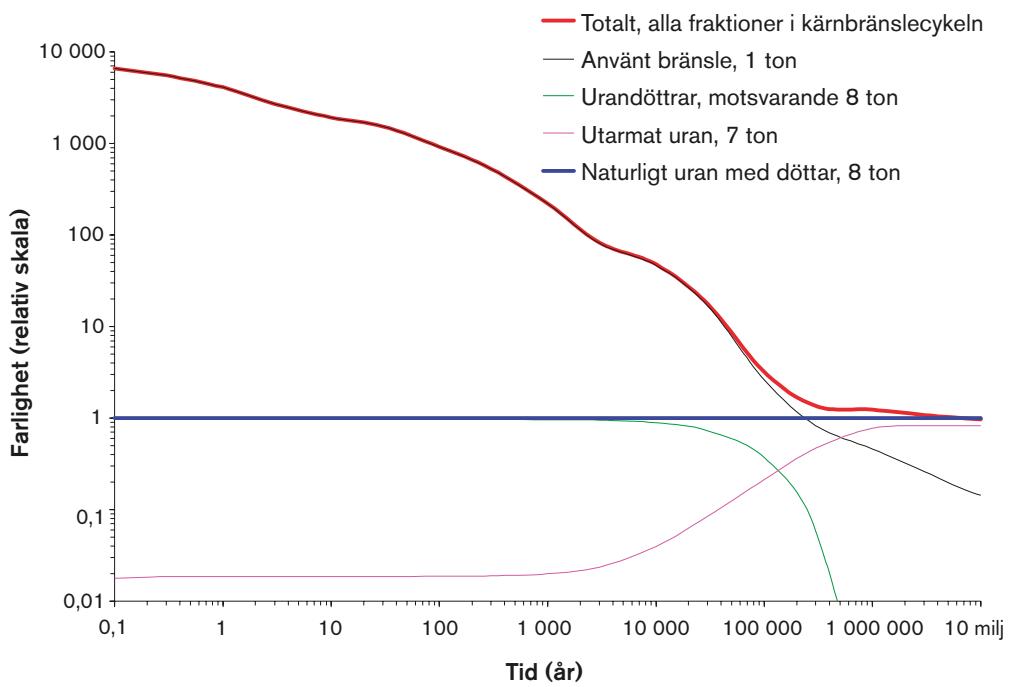
Farligheten i använt kärnbränsle domineras helt av aktinider, närmare bestämt av plutonium och americium, från något hundratals år och framåt (se figur 2-9).



Figur 2-9. Farlighet vid intag via födan för använt kärnbränsle av typ SVEA 64 med en utbränningsgrad av 38 MWd/kg uran. Farligheten uttrycks i procent av farligheten en månad efter drift. Kortlivade nuklider dominarar i början då även den totala farligheten är som störst. Efter 30 år, då bränslet ska slutförvaras, och mer än 1 000 år framåt domineras farligheten av americium-241 som bildats vid sönderfall av plutonium-241.



Figur 2-10. Relativ farlighet vid inandning för använt kärnbränsle av typ SVEA 64 med en utbränningsgrad av 38 MWd/kg U. Farligheten har relaterats till farligheten för den mängd uranmalm som ursprungligen bröts för att framställa bränslet, den horisontella linjen i figuren. Farligheten vid inandning domineras helt av aktinider och aktiniddöttrar.



Figur 2-11. Farligheten vid intag via födan för uranmalm (blå linje) samt samtliga fraktioner som uppkommer då samma mängd uranmalm används i kärnbränslecykeln (röd linje). De olika fraktionerna utgörs av det använda bränslet, det utarmade uranet och de urandöttrar som avskiljs i uranverket.

2.7 Tidsskalor

Av avsnitten ovan framgår att det använda kärnbränslet är farligt på mycket lång sikt och detta är förstår relevant då den tidsskala som säkerhetsanalysen ska omfatta fastställs. En sådan tidsskala ger en allmän avgränsning av analysens omfattning och tidsgränser för till exempel radionuklidtransportberäkningar. Frågan behandlas bland annat i tillämpliga föreskrifter som citeras nedan.

2.7.1 Krav och rekommendationer från svenska myndigheter

SKI:s föreskrift SKI FS 2002:1 anger att säkerhetsanalysen ska omfatta så lång tid som barriärfunktioner behövs, dock minst tiotusen år efter förslutning. De allmänna råden till SKI:s föreskrift anger att tidsskalan för en analys ska sättas i relation till den fara som förvarets innehåll utgör, i jämförelse med naturligt förekommande radionuklidor. I de allmänna råden noteras även att ”...*Hänsyn bör dock också kunna tas till svårigheterna att göra meningsfulla analyser för extremt långa tidsrymder, bortom en miljon år...*”

SSI:s föreskrifter anger att ”*För de första tusen åren efter förslutningen skall bedömningen av slutförvarets skyddsförstånd baseras på kvantitativa analyser av effekterna på människors hälsa och miljö.*” ”*För tiden efter tusen år efter förslutning ska bedömningen av slutförvarets skyddsförstånd baseras på olika tänkbara förlopp för utvecklingen av slutförvarets egenskaper, dess omgivning och biosfären.*”

SSI:s allmänna råd anger följande med avseende på ett slutförvar för använt kärnbränsle:
”*...bör riskanalysen åtminstone omfatta cirka hundratusen år eller tiden för en glaciationscykel för att belysa rimligt förutsägbara yttersta påfrestningar på slutförvaret. Riskanalysen bör därefter utsträckas i tid så länge som den tillför betydelsefull information om möjligheten att förbättra slutförvarets skyddsförstånd, dock längst för en tidsrymd upptill en miljon år.*”

För tiden bortom cirka hundratusen år anger SSI:s allmänna råd dessutom: ”*En strikt kvantitativ jämförelse av beräknad risk mot föreskrifternas kriterium för individrisk [är] inte meningsfull. Bedömningen av slutförvarets skyddsförstånd bör istället baseras på ett resonemang kring den beräknade risken tillsammans med flera kompletterande indikatorer på slutförvarets skyddsförstånd, till exempel barriärfunktioner, aktivitetsflöden och koncentrationer i miljön.*”

2.7.2 Tidsskalor i säkerhetsanalysen

Förutom det uppenbara kravet att uppfylla föreskrifternas krav kan även argument baserade på farligheten hos använt kärnbränsle användas när en tidsskala för en säkerhetsanalys bestäms.

Efter cirka 100 000 år är farligheten för använt kärnbränsle jämförbar med den hos den naturliga uranmalm som används för att producera bränslet, se avsnitt 2.6.4. Även summan av farligheten hos alla fraktioner i kärnbränslecykeln är jämförbar med den hos den utnyttjade uranmalmen efter 100 000 år, se figur 2-11. Den sista jämförelsen är likvärdig med att jämföra farligheten hos naturligt uran-235 och uran-238 som förbrukas i reaktorn med den hos de mängder av nya substanser som bildas i reaktorn (fissionsprodukter och aktinider) och som finns kvar efter 100 000 år.

Ett annat kriterium som kan övervägas för att motivera en tidsskala för en säkerhetsanalys är att den analyserade perioden ska sträcka sig bortom den punkt i tiden då doserna från förvaret når sitt maximum. I SKB:s förra säkerhetsanalys för KBS-3-systemet, SR 97, uppträder dosmaximum inom en miljon år i de flesta beräkningsfall. En miljon år är också den analysperiod som tillämpades i SR 97. Emellertid finns det även exempel där dosmaximum uppträder i slutet av analysperioden, på grund av inväxt av den naturligt förekommande nukliden radium-226 från uran-238 i bränslet. Eftersom KBS-3-konceptet är inriktat mot fullständig isolering av avfallet genom inkapsling under en tidsperiod som sträcker sig mycket långt in i framtiden, bedöms dosmaxkriteriet inte lämpligt för att definiera tidsskalan för säkerhetsanalysen.

Även i SR-Can är tidsskalan för analysen en miljon år. Denna tidsskala är i enlighet med myndigheternas föreskrifter och allmänna råd enligt ovan. Perioden är dessutom längre än den som krävs för att minska farligheten hos inventariet till en nivå som är jämförbar med den hos motsvarande mängd naturlig uranmalm. Det bör även noteras att de viktigaste radionukliderna som återstår i avfallet efter en miljon år är de som förekommer i naturlig uranmalm, till exempel uran-238.

Så som anges i de allmänna råden till SSI:s föreskrifter är riskkriteriet tillämpligt som en kvantitativ föreskrift under de första cirka ethundratusen åren, och därefter som ett underlag för diskussion om slutförvarets skyddsformåga. Riskberäkningarna i SR-Can görs därför till en miljon år, och resultatet används i enlighet med SSI:s allmänna råd i diskussionen om uppfyllelse av myndigheternas krav i kapitel 7.

2.7.3 Tidsskalor av betydelse för förvarets utveckling

Det finns flera tidsskalor som är relevanta då förvarets utveckling ska beskrivas. Dessa sammanfattas nedan.

- En grundläggande tidsskala är den som beskriver minskningen av avfallets farlighet, så som framgår av figur 2-11. Vid tiden för deponering har farligheten minskat med ungefär en faktor tio i jämförelse med situationen en månad efter avslutad reaktordrift. Den fortsätter sedan att minska med ungefär en faktor tio för varje tiofaldigande av tiden. Efter cirka 100 000 år är farligheten för använt kärnbränsle jämförbar med den hos den naturliga uranmalm som används för att producera bränslet.
- Tidsskalan för långsiktiga geologiska processer är miljontals år. Dessa inkluderar tektoniska rörelser hos kontinentalplattor och de bergsspänningar som orsakas av dessa rörelser.
- Klimatförändring uppträder på tidsskalor från några tiotal år till över en miljon år. En grundläggande tidsskala är kopplad till längden hos de istider som under de senaste cirka 700 000 åren har uppträtt i 100 000-åriga cykler. I Sverige kan det i varje sådan cykel ingå flera perioder av permafrost och glaciala (istäckta) förhållanden. Mekaniska, hydrogeologiska och grundvattenkemiska förhållanden i förvarsberget varierar med klimatutvecklingen, framför allt under perioder med nedisning. Det är sannolikt att dessa cykler i framtiden kommer att påverkas av mänskligt orsakade klimatförändringar, men storleken och varaktigheten hos sådana störningar är föremål för betydande debatt.
- Det finns ett antal tidsskalor för den biologiska evolutionen: Så har till exempel människan utvecklats avsevärt under de senaste hundra tusen åren.
- Den naturliga utvecklingen av ekosystem i allmänhet kan leda till stora förändringar sett i ett perspektiv på 1 000 år. Ett exempel är de kustnära ekosystemen i Sverige som påverkas starkt av landhöjningen.
- De flesta aspekter på samhället har förändrats kraftigt under de senaste 100 åren och stora förändringar kan uppstå abrupt eller över ett fåtal år. Mänskligentens skrivna historia sträcker sig några tusen år bakåt i tiden.
- Den termiska utvecklingen hos ett KBS-3-förvar på grund av bränslets resteffekt ger upphov till maximala temperaturer i närheten av kapslarna efter en period av i storleksordningen tio år, samt förhöjda temperaturer i förvarsberget under några tusental år.
- Tiden för att vattenmätta buffert, återfyllning och förvarsberg sträcker sig typiskt mellan tiotals och hundratals år för svenska förhållanden.
- De kemiska förhållandena i förvarsberget efter driften av ett slutförvar förväntas i stort ha återgått till naturligt tillstånd i ett perspektiv på 100 till 1 000 år. De kemiska förhållandena i bufferten ändras i viss mån under perioden av förhöjda temperaturer. Kapselkorrosionen under typiska förvartsförhållanden är sådan att det tar miljontals år till kapselbrott.

3 Den föreslagna lösningen – ett KBS-3-förvar

Avsnitten 3.1 till 3.4 bygger på kapitel 4 och avsnitt 3.5 på kapitel 7 i huvudrapporten SR-Can.

3.1 Inledning

I detta kapitel beskrivs uppbyggnaden av ett KBS-3-förvar. Utvecklingen av KBS-3-konceptet har styrts av ett antal *säkerhetsprinciper*. Dessa sammanfattas i avsnitt 3.2. I avsnitt 3.3 beskrivs de grundläggande komponenterna i förvaret – kapseln, bufferten, deponeringstunneln och berget. Avsnitt 3.4 behandlar de två kandidatplatserna Forsmark och Laxemar samt de platsanpassade förvarslayouterna. I avsnitt 3.5 beskrivs de säkerhetsfunktioner de grundläggande komponenterna i förvaret har i ett långsiktigt perspektiv.

3.2 Säkerhetsprinciper som legat till grund för utformningen

Sedan arbetet med det svenska slutförvarsprojektet inleddes i slutet av 1970-talet har SKB etablerat en rad principer för utformningen av ett slutförvar. Dessa principer kan sägas utgöra säkerhetsfilosofin bakom KBS-3-metoden. De sammanfattas nedan.

- Genom att placera slutförvaret på stort djup i en långsiktigt stabil geologisk miljö, isoleras avfallet från människor och ytnära miljö. Det betyder att förvaret inte påverkas i högre grad av vare sig samhälleliga förändringar eller av direkta effekter av långsiktiga klimatförändringar på jordens yta.
- Genom att placera slutförvaret på en plats där förvarsberget kan antas ha litet ekonomiskt intresse för framtida generationer minskar risken för mänskligt intrång.
- Det använda kärnbränslet omges av flera tillverkade och naturliga säkerhetsbarriärer.
- Barriärernas primära säkerhetsfunktion är att isolera bränslet.
- Om isoleringen skulle brytas är barriärernas sekundära säkerhetsfunktion att födröja ett eventuellt utsläpp från förvaret.
- Tillverkade barriärer ska bestå av naturligt förekommande material som är långsiktigt stabila i förvarsmiljön. De långsiktiga materialegenskaperna ska kunna verifieras.
- Förvaret ska utformas så att höga temperaturer som kan ha skadlig effekt på barriärernas egenskaper på lång sikt undviks.
- Barriärerna ska vara passiva, det vill säga de ska fungera utan mänskliga ingrepp och utan aktiv tillförsel av material eller energi.

Tillsammans med många andra aspekter, som de ramar som ges av Sveriges geologiska miljö och kravet att förvaret måste vara tekniskt möjligt att bygga, har dessa principer lett fram till KBS-3-systemet för slutförvaring av använt kärnbränsle.

3.3 KBS-3-förvaret

Förvarets utformning bygger på KBS-3-metoden där det använda bränslet placeras i kopparkapslar med en insats av gjutjärn, omges med en buffert av bentonitlera och deponeras på omkring 500 meters djup i granitiskt berg, se figur 3-1.

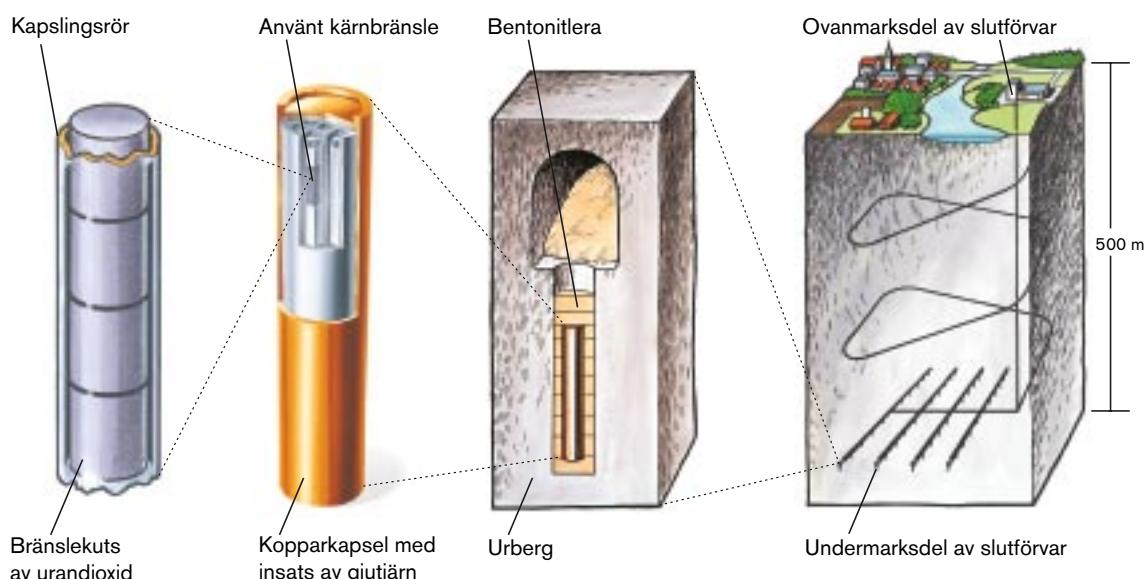
Förvarsutformningen med bergrum, tunnlar, deponeringspositioner etc. baseras på den design som ursprungligen presenterades i KBS-3-rapporten 1983. Utformningen har sedan dess utvecklats och detaljerats. Deponeringstunnlarna sammanbinds av transporttunnlar och ventilationsschakt. Ett eller flera schakt förbindar underjordsanläggningen med markytan. Tyngre transporter kan göras i schakt eller ramp. Förvarets delar visas i figur 3-2.

Sveriges kärnenergiprogram förväntas ge upphov till 9 000 ton använt kärnbränsle, motsvarande cirka 4 500 kapslar i ett KBS-3-förvar. Siffrorna grundar sig på 40 års drifttid för reaktorerna. För att ge utrymme för osäkerheter i omfattningen av det svenska kärnkraftprogrammet baseras analyserna i SR-Can på ett förvar med 6 000 kapslar, vilket motsvarar 12 000 ton använt bränsle.

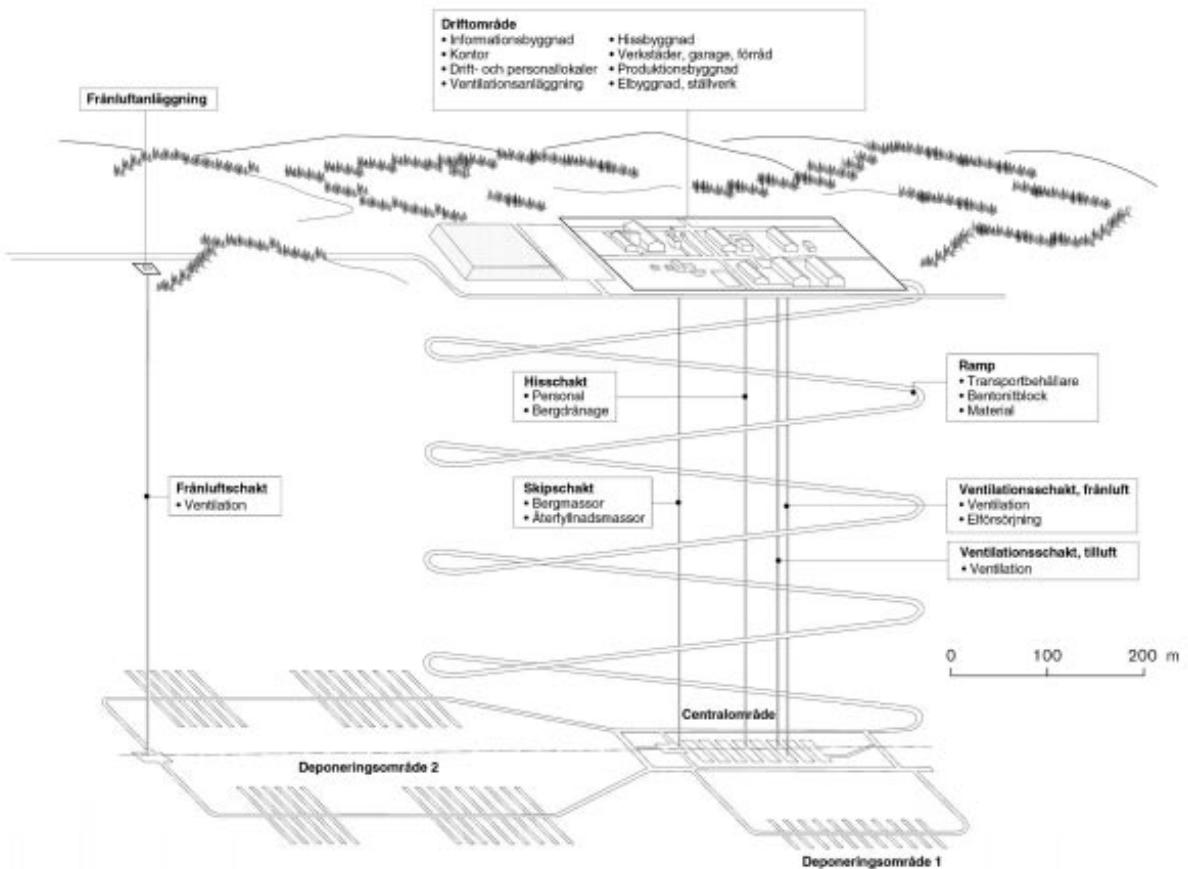
För säkerhetsanalysens syfte har förvarssystemet delats in i ett antal komponenter:

- Bränslet.
- Gjutjärnsinsatsen och kopparkapseln.
- Buffern i deponeringshålet.
- Bottenplattan i deponeringshålet.
- Deponeringstunneln med dess återfyllningsmaterial.
- Övriga bergrum med återfyllningsmaterial, till exempel transporttunnlar schakt och centralområde.
- Pluggar i förvaret.
- Undersökningsborrhål med förslutningsmaterial.
- Berget.
- Biosfären.

Uppdelning är gjord med hänsyn till att man vill ha komponenter som är så homogena som möjligt utan att antalet komponenter blir för stort. Homogenitet underlättar både karakteriseringen av en komponent och strukturering och hanteringen av processer av betydelse



Figur 3-1. KBS-3-metoden för slutförvaring av använt kärnbränsle.



Figur 3-2. Exempel på förvarsutformning.

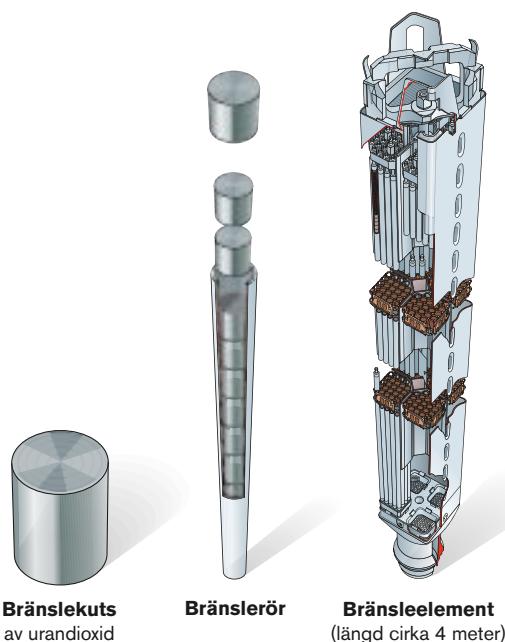
för dess långsiktiga utveckling. Också betydelsen av en viss förvarsdel för säkerheten har påverkat uppdelningen. Komponenter närmare det använda bränslet och av större betydelse för säkerheten beskrivs mer detaljerat än perifera delar. De viktigaste komponenterna beskrivs mer i detalj i avsnitten 3.3.1 till 3.3.4.

3.3.1 Bränslet

Den totala mängden bränsle från de svenska kärnreaktorerna beror på drifttid, energiuttag och bränslets utbränningsgrad. Vid slutet av 2005 hade ungefär 6 300 ton använt bränsle genererats. Med en drifttid på 40 år för alla reaktorer, utom för Barsebäck 1 och 2 som togs ur drift under 1999 respektive 2005, har den totala mängden använt kärnbränsle uppskattats till 9 300 ton.

Flera typer av bränsle ska deponeras i förvaret. För alternativet med 40 års reaktordrift uppskattas mängden BWR-bränsle till drygt 7 000 ton och mängden PWR-bränsle till drygt 2 000 ton. Utbränningsgraden kan variera från 15 till 60 MWd/kgU värmeenergi. Dessutom kommer 23 ton Mox-bränsle och 20 ton bränsle från reaktorn i Ågesta att deponeras. Mox-bränslet har en genomsnittlig utbränning på 31 MWd/kgHM. Ågestabränslet kommer från en tungvattenreaktor. För närvarande finns det 222 sådana bränslelement i Clab. De flesta av dessa (cirka 70 procent) innehåller naturligt uran. Övriga är anrikade till 1,35 procent (ett bränslelement innehåller 2,2 procent uran-235). Utbränningsgraden varierar från 0 till 10 MWd/kgU. Figur 3-3 visar hur ett bränslelement av BWR-typ byggs upp av bränslestavar som i sin tur består av ett antal bränslekutsar.

Kapslarna i SR-Can antas vid deponering ha en termisk effekt på 1 700 W. Inventariet av radionuklidor beräknas för 38 MWd/kgU BWR-bränsle, vilket är högre än medelvärdet för det bränsle som idag finns i Clab. Radionuklidinventariet påverkas relativt lite av utbränningsgraden.



Figur 3-3. Bränslekuts, bränslestav och bränslelement av BWR-typ.

3.3.2 Kapseln

Kapseln består av en insats av gjutjärn och ett ytterhölje av koppar, se figur 3-4. Gjutjärnsinsatsen ger mekanisk stabilitet och kopparhöljet skyddar mot korrosion i förvarsmiljön. Kopparhöljet är 50 millimeter tjockt och den cylindriska kapseln är cirka 4,8 meter lång och har en diameter på 1,05 meter. Insatsen har kanaler där bränslelementen placeras. För kapseln är de materialrelaterade osäkerheterna små.

Insatsen finns idag i två versioner: en för 12 BWR-element och en för 4 PWR-element. En kapsel rymmer cirka två ton bränsle. Kapslar med BWR- och PWR-element väger 25 respektive 27 ton. Resteffekten i det använda kärnbränslet i en kapsel begränsas till 1 700 W, för att uppfylla de temperaturkrav som ställs av bentonitbufferten.

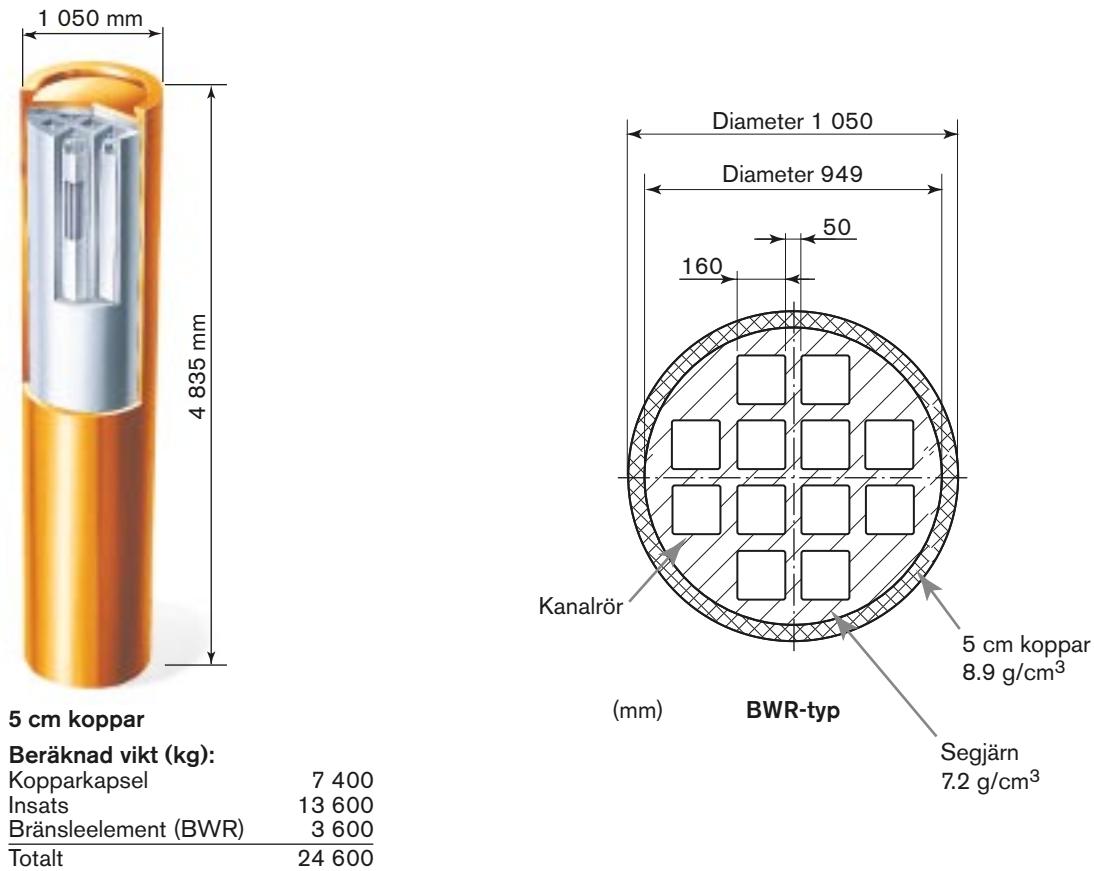
SKB har testat fyra möjliga metoder att tillverka kopparrören: Valsning av kopparplåt till rörhalvor som svetsas samman, extrusion av sömlösa rör, stansning och dragning samt smidning. Alla dessa metoder ger en kopparcylinder som måste bearbetas på in- och utsidan och på ändytorna för att få önskade mått. Referenskapseln i SR-Can förutses vara tillverkad som ett sömlöst rör. Lock och bottnar av koppar bearbetas till önskade mått från varmsmida ämnen. Masstillverkning av kapseldelar, det vill säga insats, kopparrör samt lock och botten kan komma att genomföras av olika företag med olika metoder, förutsatt att definierade krav uppfylls.

Lock och botten svetsas på kopparkapseln med FSW (Friction Stir Welding) i referensfallet. Radiografi- och ultraljudsteknik för oförstörande provning (Non Destructive Testing, NDT) av kapslar och svetsar utvecklas och har genomgått en första utvärdering.

Bränslet placeras i kapseln i inkapslingsanläggningen. Insatsen försluts med ett lock som fixeras med en bult. Kopparrörets lock svetsas fast och svetskvaliteten verifieras genom oförstörande provning.

Minimal initial godstjocklek för koppar

Defekter under normal produktion har observerats i en testserie med 20 kapsellock. Maximal defektstorlek ligger i storleksordningen några millimeter – den största uppmättes till 4,5 millimeter.



Figur 3-4. Kapseln med sin gjutjärnsinsats och sitt kopparhölje. Sprängskiss till vänster och tvärsnittsvy till höger.

Baserat på resultat från statistisk analys av testserien antas pessimistiskt att alla kapslar *förslutna under normal produktion* har en koppargodstjocklek på minst 40 millimeter. Normal produktion definieras som förhållanden där data vid övervakningen av förslutningsprocessen ligger inom ett definierat ”processfönster”.

En första utvärdering av tillförlitligheten hos förslutningsprocessen i sig själv, av dess övervakningsfunktioner och av NDT-tekniken antyder att sannolikheten för driftstörningar som leder till koppargodstjocklekar under 40 millimeter är mycket låg. En första grov uppskattning är att maximalt en procent av kapslarna som lämnar inkapslingsanläggningen skulle ha sådana defekter. Ett första, pessimistiskt, antagande är att alla sådana kapslar har en minsta koppargodstjocklek på 35 millimeter, det vill säga acceptanskriteriet för förslutningssystemet.

Därför ansätts att 99 procent av kapslarna har en godstjocklek mellan 40 och 50 millimeter och en procent mellan 35 och 40 millimeter i referensinitialtillståndet i SR-Can. Dessa godstjocklekar avser endast kapslarnas förslutningar. Huvuddelen av kopparhöljet förutsätts ha godstjockleken 50 millimeter.

Detta betraktas som pessimistiskt baserat på idag tillgängliga resultat. Beräknade indata torde komma att förändras efter hand som förslutningsprocessen och analysen av dess prestanda utvecklas ytterligare, och metoderna för att ta fram dessa indata för säkerhetsanalyssyften förbättras.

Fördelningen tillämpas både för lock- och bottensvetsar eftersom dessa ska svetsas och inspekteras med samma metoder.

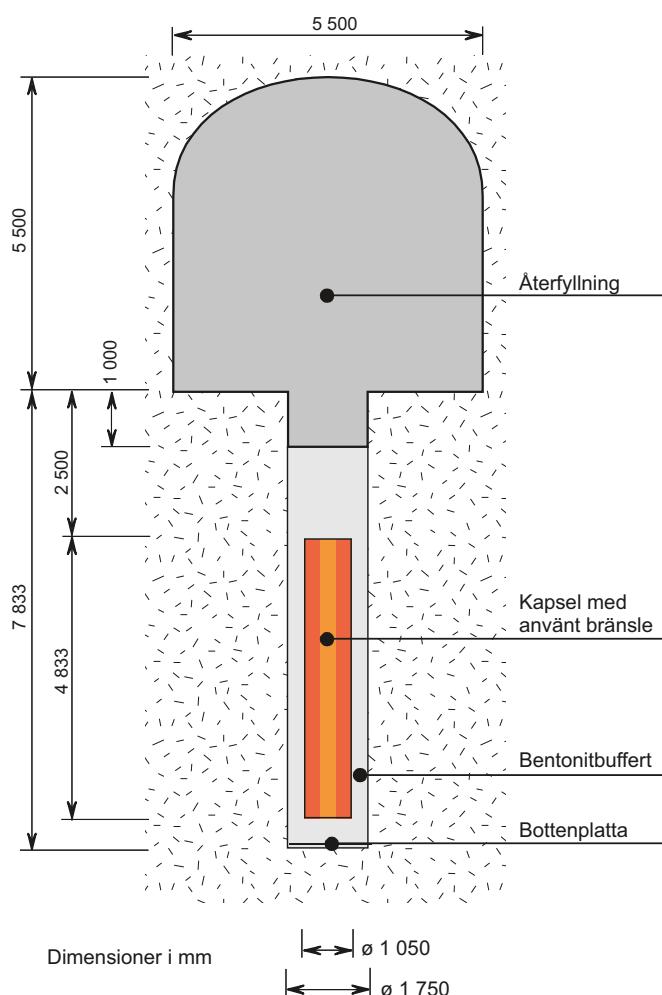
3.3.3 Bufferten

I deponeringshålen omges kopparkapslarna av en buffert av lera, figur 3-5. Bufferten deponeras i form av bentonitblock under och över kapseln, och som ringar som omger kapseln. Varje bentonitblock är omkring 50 centimeter högt och har en diameter på 1,69 meter. Ringarnas tjocklek är 31,5 centimeter. Ett block placeras under kapseln, nio ringar omger kapseln och fyra block placeras ovanför kapseln. Blocken som placeras omedelbart under och över kapseln måste bearbetas för att överensstämma med kapselns form.

Två olika typer av bentonit har valts som referensbuffertmaterial för SR-Can. En är naturlig Na-bentonit av Wyoming-typ (MX-80) som levereras av American Colloid Company och den andra är en naturlig Ca-bentonit (Deponit CA-N) från Milos, levererad av Silver and Baryte. Bentonit består huvudsakligen av smektitmineralet montmorillonit med den typiska egenskapen att svälla i kontakt med vatten. SKB har ännu inte sluttgiltigt valt ett buffertmaterial. De två material som analyseras i SR-Can är bara exempel på möjliga alternativ.

Bentoniten, som köps in i bulkform och transportereras på fartyg, ska kvalitetskontrolleras både före lastning på fartyg och vid mottagande. Kvalitetskontroll ska även ske under tillverkningen av block och ringar. Det är viktigt att kontrollera vattenhalten före pressning så att den blir enligt specifikation.

Det viktiga övergripande syftet i tillverkningen av bentonitblock och -ringar samt den efterföljande deponeringsprocessen är att uppnå en specificerad slutlig densitet i den vattenmättade bufferten. Densitetskravet på mättad buffert är 1 950–2 050 kg/m³.



Figur 3-5. Deponeringshål med bentonitbuffert och kapsel. Två tänkbara material för återfyllningen i tunnel analyseras I SR-Can: Friedlandlera och en blandning av bentonitlera och krossat berg.

3.3.4 Återfyllningen i deponeringstunneln

Beslut om brytningsteknik för deponeringstunnlarna har ännu inte fattats. Två metoder är aktuella: borrning/sprängning, och mekanisk brytning med tunnelborrmaskin. I SR-Can analyseras dock endast alternativet borrning och sprängning. Valet av brytningsteknik kommer att påverka deponeringstunnlarnas mått och form, samt i vilken omfattning det omgivande förvarsberget påverkas av brytningen. Tvärsnittet i en tunnel som brutits med borrning och sprängning är kvadratiskt med välvt tak, medan tvärsnittet av en mekanisk bruten tunnel är cirkulärt.

Två återfyllningskoncept analyseras i SR-Can:

- Forkomakterade block av naturligt svällande lera (inte nödvändigtvis en bentonit). I SR-Can används Friedlandlera som exempel på ett sådant material. Hela tunneln fylls med forkomakterade block. Utrymmet mellan berget och blocken fylls med pellets av samma material.
- De forkomakterade blocken tillverkas av en blandning av bentonit av buffertkvalitet och bergkross, med viktförhållandet 30/70. Utrymmet mellan berget och blocken fylls med bentonitpellets. Den maximala kornstorleken för ballastmaterialet (bergkrosset) antas vara 5 millimeter.

3.3.5 Egenskaper hos de tillverkade barriärerna av särskild betydelse för säkerheten

Från tidigare säkerhetsanalyser, och från den allmänna förståelsen av förvarets säkerhet har ett antal säkerhetskritisika aspekter av de tillverkade barriärerna identifierats:

- Resteffekten hos det använda bränslet i varje kapsel, som påverkar den kortslitiga termiska utvecklingen av slutförvaret och den maximala temperaturen i närronen.
- Kopparkapselns täthet, i synnerhet kvaliteten hos förslutningssvetsarna.
- Hållfastheten hos gjutjärnsinsatsen, vilken påverkas av gjutprocessens kvalitet.
- Mängd och sammansättning av buffertlera i varje deponeringshål – dessa värden påverkar buffertens slutliga densitet efter att den vattenmättats,
- Mängd och sammansättning av återfyllningsmaterialet i varje deponeringstunnel – dessa värden påverkar återfyllningens densitet efter att den vattenmättats.

3.4 Platserna och förvarslayouterna

3.4.1 Från platsdata till SR-Can

Informationsöverföringen från platsundersökningarna till säkerhetsanalysen omfattar flera steg. Fälldata hämtas från olika undersökningsverksamheter, som flygundersökningar, provborrningar och borrhålsundersökningar. Data kvalitetskontrolleras och matas in i SKB:s platsdatabas, Sicada. Fälldata tolkas och utvärderas i en integrerad och tvärvetenskaplig platsbeskrivningsmodell (SDM – Site Descriptive Model) som beskriver platsens geologiska, bergmekaniska, termiska, hydrogeologiska, geokemiska, och transportegenskaper samt egenskaper hos ytsystemet. Platsdata som används i SR-Can värderas i en särskild **Datarapport** för SR-Can (se vidare punkt 6 i avsnitt 4.2) med version 1.2 av den platsbeskrivande modellen som grund. Denna version är baserad på platsdata från den inledande fasen av platsundersökningarna. Datarapporten beskriver även hur icke plattsspecifik information används.

3.4.2 Forsmark

Kandidatplatsen Forsmark ligger i norra Uppland, i Östhammars kommun, figur 3-6.

Landskapet kring Forsmark utgörs av en relativt plan urbergsplatå som sluttar svagt mot öster. Hela området är utpräglat låglänt och ligger under högsta kustlinjen från avsmältningen av den senaste inlandsisen. Landskapet är starkt påverkat av den pågående landhöjningen som är cirka 6 millimeter per år.

En stor del av landytan i området utgörs av avlagringar i form av morän och lera. Dessa innehåller mycket karbonat, vilket tillsammans med att området relativt nyligen har höjt sig över havsytan medför att ytvatten och ytnära grundvatten har höga pH-värden.

Berggrunden i Forsmark har sitt ursprung i botten av en mäktig bergskedja, den Svekokarelska bergskedjan. Den började bildas för cirka 1 890 miljoner år sedan då en oceanplatta och en kontinentplatta kolliderade. För ungefär 1 870 miljoner år sedan började de vulkaniska bergarterna, sedimenten, kalkstenarna och malmerna att veckas och granitisk magma trängde in och stelnade långsamt till granit. Sammanpressningen av plattorna skapade rörelser och spänningarna koncentrerades i band, där bergarterna blev starkt deformrade, veckade och förskiffrade. Mellan banden bildades linsformade mindre deformrade områden, så kallade tektoniska linser. Kandidatområdet i Forsmark ligger i den nordvästligaste delen av en av dessa tektoniska linser.

På grund av sin historia är urberget inom linsen i kandidatområdet förhållandevis homogen och inte speciellt deformerat. Den dominerande bergarten är en granit med hög kvartshalt och därmed hög värmeförståndsförstånd. Även bergets mekaniska hållfastighet är hög jämfört med vad som är typiskt för svenskt berg. Utanför linsen är berget mer deformerat och sammansättningen är mer inhomogen.

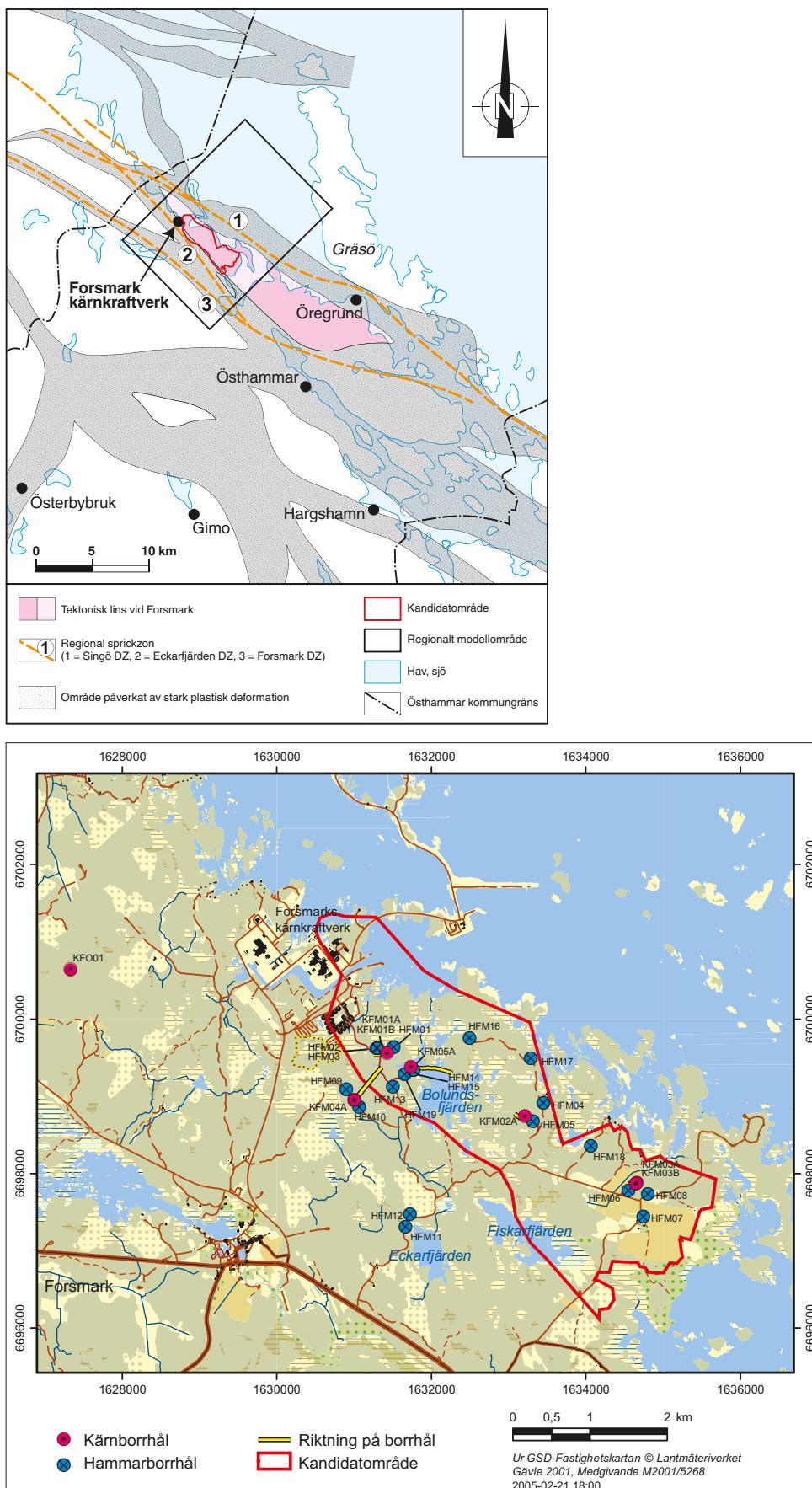
Inga tecken på fyndigheter av metaller eller industrimineraler av ekonomiskt värde har konstaterats i kandidatområdet.

Deformationszonerna i området har sitt ursprung i den deformationen av berget som skedde i samband med bildningen av den Svekokarelska bergskedjan och zonerna har i huvudsak tre olika riktningar. De regionala zonerna som omger linsen – Singözonen, Forsmarkszon och Eckarfjärdzonen – är vertikala eller brantstäende och löper i en nordvästlig till västnordvästlig riktning. Kortare brantstäende zoner med en ostnordostlig eller nordnordostlig riktning, de allra flesta kortare än 3 kilometer, går tvärs över kandidatområdet. Flacka zoner med svag sydlig till sydostlig stupning förekommer huvudsakligen i den sydöstra delen av kandidatområdet. Den mest nordvästliga av dessa zoner är den så kallade zon A2. Dessa flacka zoner har högre vattengenomsläppighet än de brantstäende zonerna.

Analyser av sprickdata har visat att sprickorna har olika egenskaper i olika delar av berget i kandidatområdet. I det mer ytliga berget i den nordvästra delen av kandidatområdet finns i huvudsak flacka och horisontella sprickor, som är öppna och mycket vattenförande. På större djup i berget nordväst om den flacka sprickzonen A2 är sprickorna färre och endast ett fåtal är vattenförande. Här är också spänningarna i berget stora i jämförelse med typiska värden för svensk berggrund, möjlig koppling till den låga förekomsten av sprickor i denna del av berggrunden.

Grundvattnet i de översta cirka 200 metrarna av berggrunden har en sammansättning som visar att det bildats under dagens klimatförhållanden. På djup mellan 200 och 800 meter är salthalten nästan konstant (5 000–6 000 mg/l) och vattensammansättningen uppvisar spår från Litterinahavets vatten, det vill säga vatten från det hav som täckte Forsmark för 9 500 till 5 000 år sedan. På djup mellan 800 och 1 000 meter ökar salthalten till värden runt 10 000 mg/l.

Den nordvästra delen av kandidatområdet ses som det lämpligaste för ett slutförvar eftersom frekvensen av öppna och delvis öppna sprickor här, nordväst om den svagt stupande deformationszonen A2, är mycket låg under cirka 300 meters djup och endast ett fåtal av dessa har en mätbar vattengenomsläppighet.



Figur 3-6. Övre bilden: Den tektoniska linsen i Forsmark. Nedre bilden: Den undersökta kandidatvolymen (röd avgränsning). Förvaret är tänkt att placeras i den nordvästra delen av kandidatvolymen.

3.4.3 Laxemar

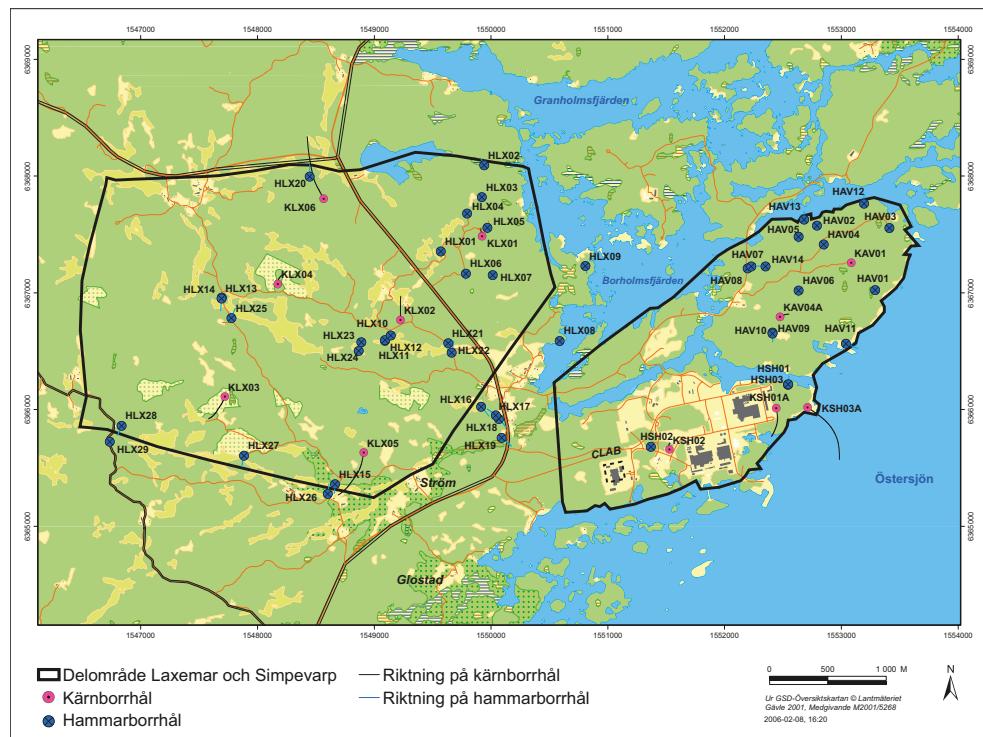
Platsen Laxemar är en del av kandidatområdet Simpevarp i Oskarshamns kommun, se figur 3-7. Topografin är relativt flack. Hela området ligger under den högsta kustlinjen från den senaste avsmältningen av inlandsis. Det pågår fortfarande en vertikal landhöjning på cirka 1 millimeter per år.

Områdets norra och centrala delar domineras av Ävrögranit, medan det i den södra delen finns bergområden som huvudsakligen består av kvartsmonzodiorit och diorit till gabbro. Denna formation bildar en båge som lutar mot norr och vars konkava sida är riktad mot norr. Inga indikationer på fyndigheter av metaller eller industrimineraler har konstaterats i området. Många av bergarterna i delområdet Laxemar har låg och rumsligt varierande kvartshalt. Detta ger upphov till låg och varierande värmeförädlingsförmåga, i jämförelse med typiska värden för svensk berggrund. Hållfastheten är relativt låg i de flesta typerna av berggrund, och spridningen är relativt stor. Emellertid baseras dessa resultat på data från ett fåtal prov och de kan vara påverkade av närheten till en större deformationszon.

Deformationszonerna löper i huvudsak i nord-sydlig och öst-västlig riktning. Sprickbildningen är mycket varierande och kunskapen om det detaljerade spricknätverket är osäker. Den begränsade tillgången på data för Laxemar vid tiden då data för SR-Can frystes antyder att bergvolymen skulle kunna delas in i hydrogeologiska områden med olika och djupberoende hydrogeologiska egenskaper. Nya data som har kommit fram efter att data frystes ger starkt stöd för detta och att bergsområdena i södra Laxemar har lägre vattenföring än de i norra Laxemar.

I Laxemar finns sött vatten ner till ett djup av 800 m. Bräckt vatten förekommer på intermediära djup (500–950 m). På större djup (900–1 200 m) blir vattnet salt (6 000–20 000 mg/l Cl). Vatten med hög salthalt (> 20 000 mg/l Cl) har bara hittats på djup större än 1 200 m.

Även om version 1.2 av den platsbeskrivande modellen för Laxemar bygger på en stor mängd data är bara ett fåtal mätningar representativa för den tilltänka förvarsvolymen. Detta gäller särskilt data om sprickor samt termiska och hydrogeologiska data. Data som samlats in efter att



Figur 3-7. Borrplatserna vid Laxemar (det västliga området) och Simpevarp (det ostliga området) i Oskarshamn.

den platsbeskrivande modellen togs fram kommer att tillåta en utförligare uppsättning analyser (liknande den för Forsmark) även för Laxemar. Dessa data antyder också mer gynnsamma hydrogeologiska egenskaper inom den tilltänkta förvarsvolymen än vad platsmodellen i SR-Can visar. Inom SR-Can har en mer begränsad uppsättning analyser för platsen Laxemar genomförts.

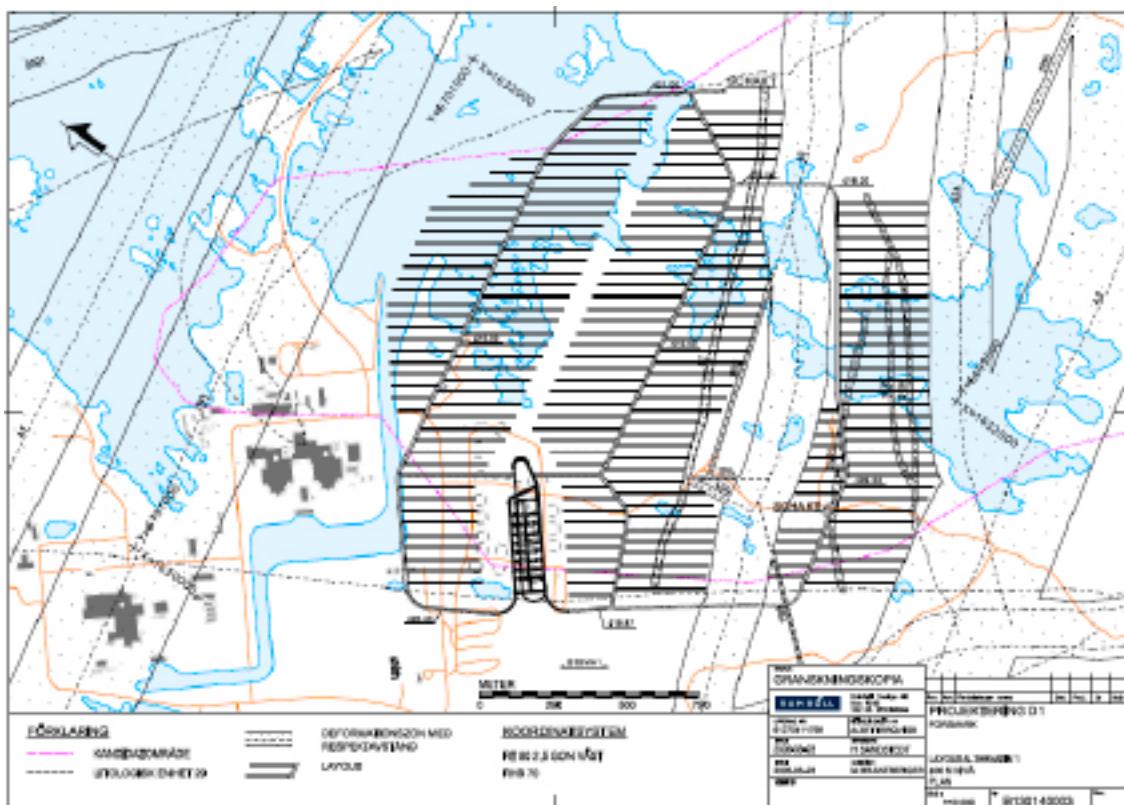
3.4.4 Förvarslayouter

Preliminära förvarslayouter, baserade på platsbeskrivningarna, har tagits fram för de båda platserna. Layouterna avser ett slutförvar för 6 000 kapslar. Vid Forsmark har layouten för SR-Can tagits fram för nivån –400 meter och vid Laxemar för nivån –500 meter, se figur 3-8 respektive figur 3-9.

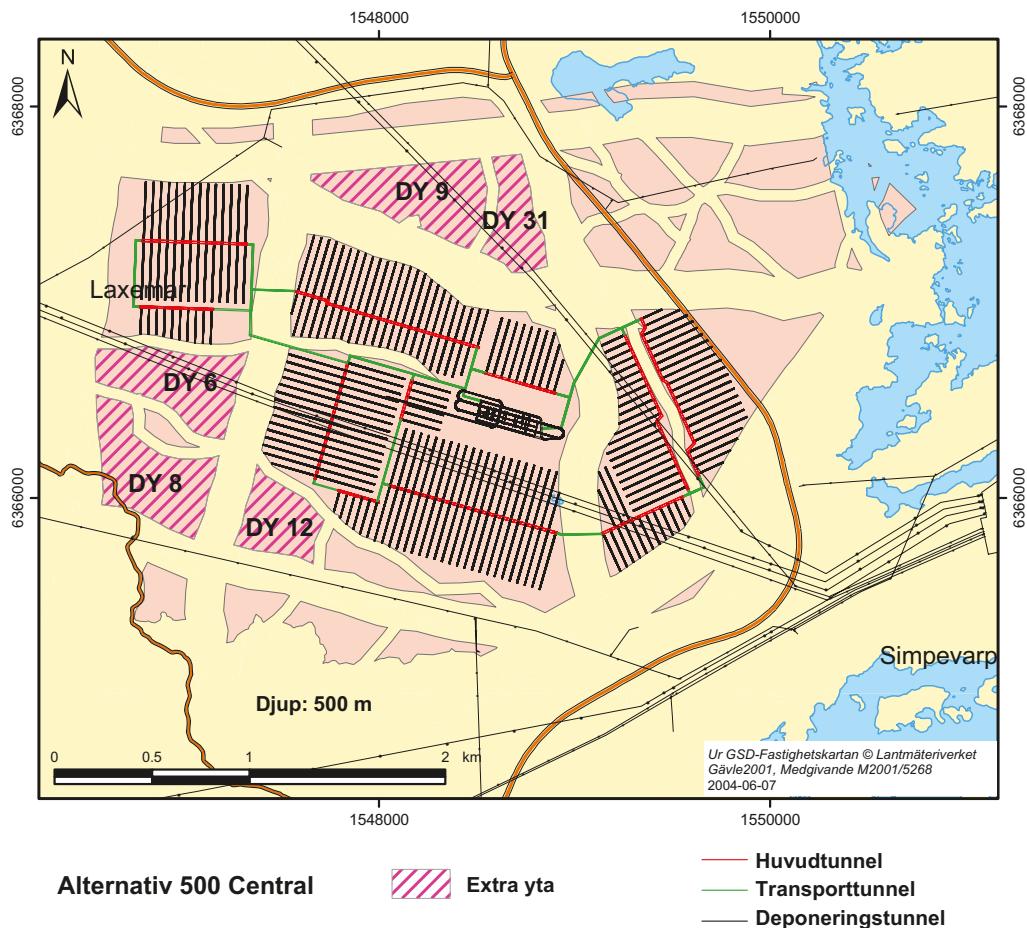
För att undvika skadlig inverkan från eventuella framtida jordskalv tillämpas ett respektavstånd till de deformationszoner som har en längd överstigande 3 kilometer.

Ett minsta tillåtet avstånd mellan kapslarna fastställs utgående från bergets värmeleddningsförmåga, för att säkerställa att buffertens temperatur aldrig kommer att överstiga 100 °C. Avståndet är 6 meter i Forsmark och 7,2 meter i Laxemar.

En del deponeringspositioner kommer i verkligheten att behöva förkastas eftersom de korsas av sprickor som kan befaras vara så stora att de skulle kunna orsaka kapselskador om ett större jordskalv skulle uppstå i förvarets närhet. Andelen sådana positioner kan idag bara fastställas på statistisk grund. Sådana och andra analyser gör att ungefär 90 procent av deponeringspositionerna bedöms kunna utnyttjas vid Forsmark och cirka 80 procent vid Laxemar. Den lägre nyttjandegraden för Laxemar beror också på att ett antal tänkbara deponeringspositioner kan ha för stora inläckage av grundvatten som skulle ha skadat bufferten om de använts. Förvarens storlek i de föreslagna layouterna har dimensionerats med hänsyn till detta.



Figur 3-8. Förvarslayout på nivån –400 meter i Forsmark.



Figur 3-9. Förvarslayout på nivån –500 meter i Laxemar.

3.5 Säkerhetsfunktioner – vad ska barriärerna göra?

De viktigaste säkerhetsrelaterade egenskaperna för KBS-3-förvaret kan sammanfattas i säkerhetsfunktionerna isolering och fördräjning.

För en detaljerad och kvantitativ förståelse och utvärdering av förvarets säkerhet krävs en fullständig beskrivning av hur de huvudsakliga säkerhetsfunktionerna isolering och fördräjning uppnås av komponenterna i förvaret. Utgående från förståelsen av komponenternas egenskaper och den långsiktiga utvecklingen av systemet kan ett antal säkerhetsfunktioner som är underordnade isolering och fördräjning läggas fast för varje komponent. Det är också viktigt att kunna uttrycka dessa funktioner i kvantitativa termer. Följande definitioner används:

- En säkerhetsfunktion är den roll som en förvarskomponent har för att bidra till säkerheten. Bufferten ska till exempel inte frysas.
- En säkerhetsfunktionsindikator är en mätbar eller beräkningsbar egenskap hos en komponent i förvaret som anger i vilken utsträckning en säkerhetsfunktion är uppfylld. Buffertens temperatur är uppenbarligen ett mått på hur väl den upprätthåller funktionen att inte frysas och därmed funktionsindikatorn i detta fall.
- Ett kriterium för en säkerhetsfunktionsindikator är en kvantitativ gräns. Om funktionsindikatorn uppfyller kriteriet är motsvarande säkerhetsfunktion uppfylld. Buffertens frystemperatur är -5°C och detta är alltså kriteriet för funktionsindikatorn.

3.5.1 Kapseln säkerhetsfunktioner

Kapseln är den primära *isolerande* komponenten i förvaret. Kapseln isolerande förmåga kan gå förlorad om den påverkas kemiskt eller mekaniskt.

Den kemiska påverkan sker genom att skadliga ämnen reagerar med det metalliska koppar-materialet så att koppartjockleken minskar på de ställen där kapselytan angrips. Fenomenet kallas korrosion. De skadliga ämnena kan finnas initialt i bufferten eller tillföras genom bergets grundvatten.

Den mekaniska påverkan är av två slag: Dels kan kapseln utsättas för höga tryck i förvaret, så kallade isostatiska laster från bufferten och från grundvattnet, dels kan kapseln påverkas genom rörelser i sprickor som korsar deponeringshålet, så kallade skjuvrörelser.

Kapseln måste motstå den kemiska belastningen och de två typerna av mekanisk belastning för att kunna upprätthålla sin grundläggande funktion, den att isolera det använda kärnbränslet. Därför tillskrivs kapseln tre säkerhetsfunktioner:

- Kapseln ska utgöra en korrosionsbarriär. Kapseln upprätthåller denna funktion så länge man har någon koppartäckning överallt på ytan, det vill säga så länge höljet är tätt.
- Kapseln ska motstå isostatiska (likformiga) tryck. Vid ett visst tryck kollapsar kapseln. Detta så kallade kollapstryck kan beräknas och testas i experiment. Kapseln upprätthåller denna funktion så länge de tryck den utsätts för i förvaret inte överskridet kollapstrycket.
- Kapseln ska motstå så kallade skjuvrörelser i berget. Genom omfattande beräkningar och även en del experimentella tester av hur bufferten och kapseln reagerar vid en rörelse i en spricka som korsar deponeringshålet har man fastställt att kapseln tål rörelser som understiger 10 centimeter. Kapseln motstår alltså skjuvrörelser om dessa inte överskridar 10 centimeter.

3.5.2 Buffertens säkerhetsfunktioner

Bufferten har en rad viktiga funktioner i förvaret och de rör både förvarets isolerande och fördröjande förmåga.

- Bufferten ska hindra dels skadliga ämnen från att nå kapseln, dels radionuklider från att nå det omgivande berget om kapseln skulle skadas. Framför allt är det viktigt att vatten inte kan flöda genom bufferten. Bufferten ska därför kraftigt begränsa ett eventuellt vattenflöde genom deponeringshålet och därigenom göra transport av lösta ämnen med flödande vatten, så kallad advektiv transport, till ett helt försumbart fenomen i bufferten. Denna funktion kräver att bufferten har en mycket låg vattenledningsförmåga, så kallad hydraulisk konduktivitet. Den ska inte överstiga 10^{-12} m/s.

Denna funktion kräver också att bufferten är helt tät, vilket i sin tur kräver att den sväller vid vattenkontakt så att inhomogeniteter jämnas ut. Svällförmågan mäts genom det tryck den vattenmättade bufferten utövar mot omgivningen. Detta så kallade svältryck ska vara minst 1 MegaPascal (MPa). En MPa motsvarar trycket från en cirka 100 meter hög vattenpelare.

- Bufferten ska inte omvandlas kemiskt, vilket kräver att dess temperatur inte överstiger 100 °C.
- Buffert ska inte frysa, eftersom den då skulle utsätta kapseln och det omgivande berget för stora tryck. Detta kräver att buffertens temperatur inte understiger dess frystemperatur vilken är -5 °C.
- Bufferten ska filtrera kolloider (små partiklar som kan bidra till transport av radionuklider), vilket kräver att dess densitet är minst 1 650 kg/m³.
- Bufferten ska förhindra att mikrober överlever, vilket preliminärt kräver ett svälltryck av minst 2 MPa.

- Bufferten ska dämpa effekten på kapseln av skjuvrörelser i berget, vilket kräver att dess densitet understiger $2\ 050\ \text{kg/m}^3$.
- Bufferten ska förhindra att kapseln sjunker i deponeringshålet, vilket kräver ett svälltryck av minst $0,2\ \text{MPa}$.

3.5.3 Tunnelåterfyllningens säkerhetsfunktioner

Tunnelåterfyllningen ska begränsa vattenflödet genom tunneln och därigenom begränsa transporten av radionuklider med flödande vatten, så kallad advektiv transport. För detta krävs

- att tunnelåterfyllningens vattenledningsförmåga, dess hydrauliska konduktivitet, är begränsad; den bör inte överstiga $10^{-10}\ \text{m/s}$,
- att tunnelåterfyllningen sväller i kontakt med vatten så att eventuella kanaler i tunnelåterfyllningsmaterialet tätas; materialet behöver ha ett svälltryck om $0,1\ \text{MPa}$, samt
- att tunnelåterfyllningen inte fryser, eftersom det är oklart vilka egenskaper materialet skulle ha efter att det tinat igen; tunnelåterfyllningens temperatur får därför inte understiga $0\ ^\circ\text{C}$.

3.5.4 Bergets säkerhetsfunktioner

Berget har fyra huvudsakliga säkerhetsfunktioner. Det ska ge förvaret kemiskt gynnsamma förhållanden, gynnsamma transport- och hydrologiska förhållanden, stabila mekaniska förhållanden samt gynnsamma termiska förhållanden. Var och en av dessa huvudsakliga funktioner kan brytas ned i ett antal underfunktioner.

För att ge *kemiskt gynnsamma förhållanden* bör grundvattnet i berget bland annat

- Inte innehålla syre, det vill säga reducerande förhållanden ska råda.
- Inte ha en alltför hög salthalt för att inte skada bufferten; marginalen är dock stor mellan de salthalter som kan skada bufferten till de som påträffas på förvarsdjup i svenska grundvatten.
- Ha ett tillräckligt innehåll av i första hand kalciumjoner för att förhindra att bufferten löses upp; gränsen går här vid en koncentration av 1 millimol per liter ($1\ \text{mM}\ \text{Ca}^{2+}$).
- Ha låga halter av ämnen som kan skada kapsel och buffert, såsom kalium, sulfid och järn; inga absoluta gränser går dock att ange.
- Ha ett pH-värde som understiger 11 för att inte bufferten ska ta skada.

För att ge *gynnsamma transport- och hydrologiska förhållanden* bör bland annat

- Sprickornas förmåga att leda vatten vara begränsad.
- Skillnader i grundvattentryck mellan olika delar av förvarsberget vara begränsade (det är dessa skillnader som utgör den drivande kraften för grundvattenrörelserna).
- Bergets förmåga att attrahera och hålla kvar radionuklider vara hög.
- Koncentrationen av kolloider vara låg, (kolloider är små partiklar som kan påskynda transporten av radionuklider genom att dessa inte fastnar på bergets ytor).

Det är dock inte möjligt att ange några absoluta gränser för dessa egenskaper hos berget.

För att ge *stabila mekaniska förhållanden* bör bland annat

- rörelser i sprickor som korsar deponeringshålet inte vara större än 10 centimeter, samt
- grundvattnets tryck vara begränsat.

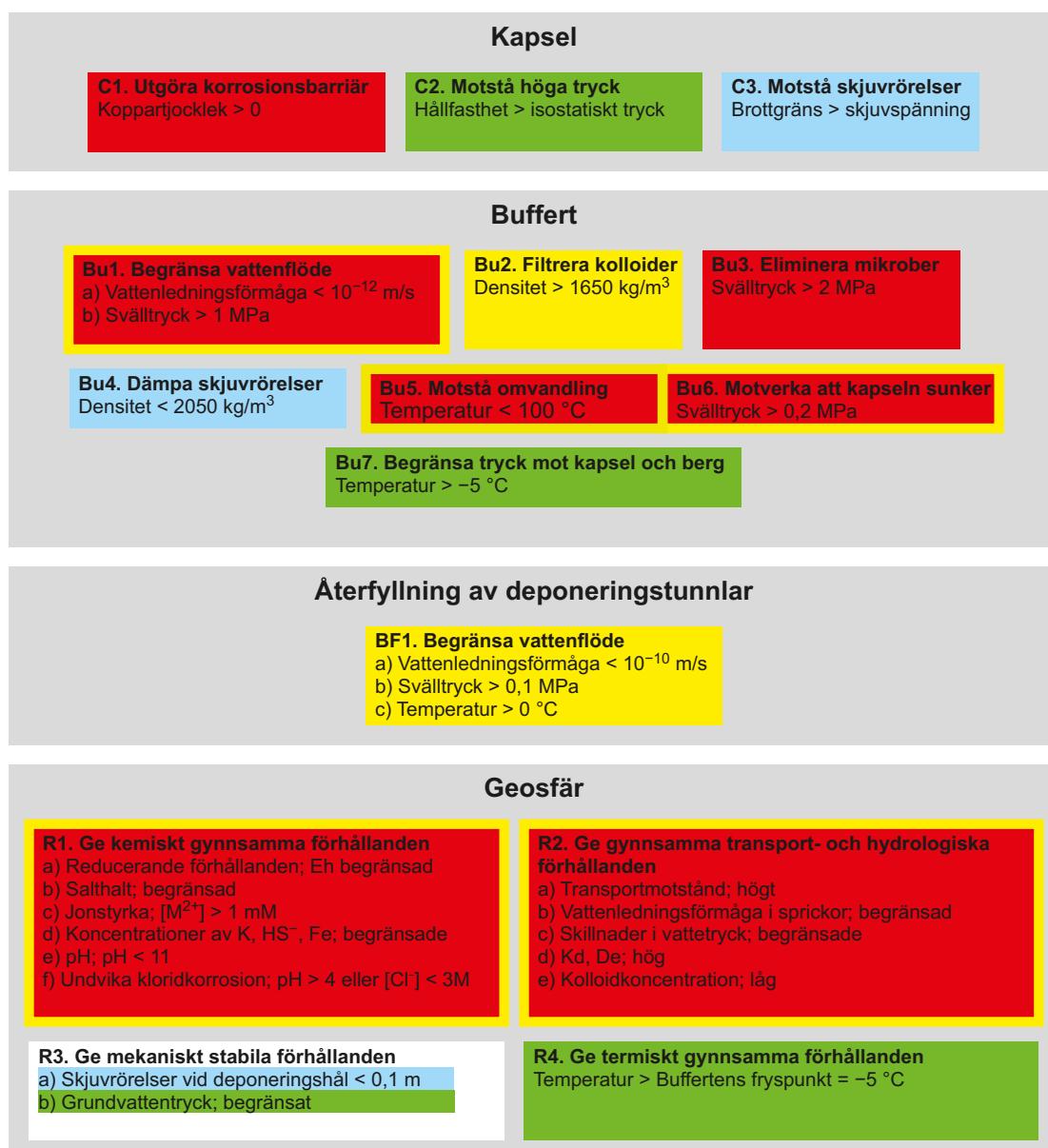
För att ge *termiskt gynnsamma förhållanden* bör temperaturen i berget överstiga buffertens frys punkt, vilken är $-5\ ^\circ\text{C}$.

3.5.5 Sammanfattning av säkerhetsfunktioner

En översikt över säkerhetsfunktioner, deras indikatorer och kriterier ges i figur 3-10. Av figuren framgår också med färgkodning hur de olika säkerhetsfunktionerna hör ihop.

Säkerhetsfunktioner bidrar till säkerhetsbedömningen, men uppfyllelse av alla kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer är varken nödvändigt eller tillräckligt för att fastställa att förvaret är säkert. De olika kriterierna för säkerhetsfunktionsindikatorer anges dessutom med olika acceptansmarginaler.

Säkerhetsfunktioner är relaterade till, men inte identiska med, konstruktionskriterier. Medan konstruktionskriterier hänsätter sig till förvarets initialtillstånd och i första hand till dess tillverkade komponenter, ska säkerhetsfunktioner vara uppfyllda under hela analysperioden och hänsätter sig till såväl tillverkade komponenter som det naturliga systemet.



Figur 3-10. Säkerhetsfunktioner (fetstil), säkerhetsfunktionsindikatorer och kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer. Om kvantitativa kriterier inte kan ges används i stället termer som "hög", "låg" och "begränsad" för att ange gynnsamma värden för funktionsindikatorerna. Färgkodningen visar hur funktionerna bidrar till kapselns säkerhetsfunktioner C1 (röd), C2 (grön), C3 (blå) eller till fördräjning (gul). Många funktioner bidrar till både C1 och fördräjning (röd ruta med gul kant).

4 Säkerhetsanalysen – metoden för att värdera lösningen

Detta kapitel bygger på materialet i avsnitten 2.1 och 2.2 i huvudrapporten SR-Can.

4.1 Inledning

Detta kapitel ger en översikt av metodiken för SR-Can. Metodiken bygger på den som presenterades i Interimsrapporten av SR-Can som i sin tur var en utveckling av metodiken som användes i SKB:s senaste stora säkerhetsanalys, SR 97. Metodikutvecklingen har också påverkats och inspirerats av flera på senare år genomförda säkerhetsanalysstudier i till exempel Schweiz, Finland, Belgien, Japan, USA, Kanada och Frankrike samt av internationella samarbetsprojekt inom området, organiserade av OECD:s kärnenergibyrå NEA.

Huvudsyftet med en säkerhetsanalys för ett slutförvar är att undersöka om slutförvaret kan betraktas som långsiktigt radiologiskt säkert. I princip görs detta genom att man jämför stråldoser från beräknade utsläpp av radionuklider från förvaret med myndighetskriterier (se avsnitt 1.4). För ett KBS-3-förvar är den primära säkerhetsfunktionen att fullständigt isolera avfallet under den period som analysen omfattar. Ett viktigt syfte med SR-Can är därför att demonstrera en nästan total isolering av avfallet under många olika förhållanden och under lång tid.

Det är viktigt att underbygga alla påståenden och antaganden i analysen med vetenskapliga och tekniska argument, för att ge tilltro till det beräknade resultatet. Att påvisa förståelse för slutförvarssystemet och dess utveckling är därför eniktig del av varje säkerhetsanalys.

Förvarssystemet, brett definierat som det deponerade använda kärnbränslet, de tillverkade barriärerna, förvarsberget och biosfären i anslutning till slutförvaret, kommer att utvecklas med tiden. Systemets framtida tillstånd kommer att bero på

- systemets tillstånd initialt, då det just byggts,
- ett antal termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska processer som verkar internt i förvarssystemet över tiden, samt
- ytter påverkan på systemet.

Interna processer är till exempel sönderfallet av radioaktivt material, vilket ger en uppvärmning av bränslet, de tillverkade barriärerna och berggrunden. Grundvattenrörelser och kemiska processer som påverkar tillverkade barriärer och grundvattnets sammansättning är andra exempel. Extern påverkan innefattar framtida klimat och klimatrelaterade processer, till exempel nedisningar och landhöjning. Även framtida mänskliga ingrepp kan påverka förvaret.

Initialtillståndet, de inre processerna och den ytter påverkan, samt de sätt på vilka dessa faktorer tillsammans bestämmer förvarets utveckling, kan aldrig till fullo beskrivas eller förstås. Det finns därför osäkerheter av olika slag förknippade med alla aspekter av förvarets utveckling och därmed med säkerhetsbedömningen. Ett centralt begrepp i varje säkerhetsanalysmetodik måste därför vara hantering av alla relevanta typer av osäkerhet. Denna hantering består av klassificering och beskrivning av osäkerheter, liksom av en adekvat hantering av dessa vid analysen av slutförvarets utveckling och av de radiologiska konsekvenser som de medför.

Den primära säkerhetsfunktionen hos KBS-3-systemet är att fullständigt isolera det använda kärnbränslet i koppar-/järnkapslar under hela analysperioden. Skulle en kapsel skadas är den sekundära säkerhetsfunktionen att fördröja och sprida eventuella utsläpp från kapseln så att dessa inte orsakar oacceptabla konsekvenser. De båda frågorna isolering och fördröjning står därför i fokus för analysen.

Nästa avsnitt ger en kortfattad översikt av analysmetodiken. Flera viktiga delar av metodiken, som valet av scenarier, är svåra att förklara till fullo utan att visa hur metodiken tillämpas. Delar av metodiken kommer därför att illustreras ytterligare i de följande kapitlen.

4.2 Metodik för SR-Can

En metodik i tio steg har utvecklats för SR-Can. Den sammanfattas i figur 4-1.

De tio stegen beskrivs närmare nedan.

1. Identifiering av faktorer av betydelse (FEP-hantering)

Detta steg består av att identifiera alla faktorer som ska ingå i analysen. Erfarenhet från tidigare säkerhetsanalyser används, tillsammans med KBS-3-specifika och internationella databaser över relevanta egenskaper, händelser och processer (eng. features, events and processes, FEP) som påverkar den långsiktiga säkerheten. En FEP-databas har utvecklats för SR-Can. I denna klassificeras de allra flesta FEP som relaterade till initialtillståndet, till inre processer eller till externa faktorer. Återstående FEP är antingen relaterade till analysmetodiken i allmänhet, eller bedömda som irrelevanta för KBS-3-metoden. Utgående från resultaten av FEP-hanteringen har en FEP-katalog för SR-Can upprättats, med FEP som ska behandlas i SR-Can. Detta steg i FEP-hanteringen beskrivs ytterligare i kapitel 3 i den engelska huvudrapporten och dokumenteras fullständigt i **FEP-rapporten**² i SR-Can.

2. Beskrivning av initialtillståndet

Systemets initialtillstånd beskrivs utgående från specifikationerna för KBS-3-förvaret, en beskrivande modell av platsen för slutförvaret och en platsspecifik layout av förvaret. Initialtillståndet för bränslet och de tillverkade komponenterna avser förhållandena omedelbart efter deponering, så som beskrivs i **Initialtillståndsrapporten**.

Initialtillståndet för geosfären och biosfären avser de naturliga förhållandena innan bergbrytningsarbetet inleds, enligt de platsbeskrivande modellerna för platserna Forsmark och Laxemar. Initialtillståndet omfattar även förvarslayouter, anpassade till platserna.

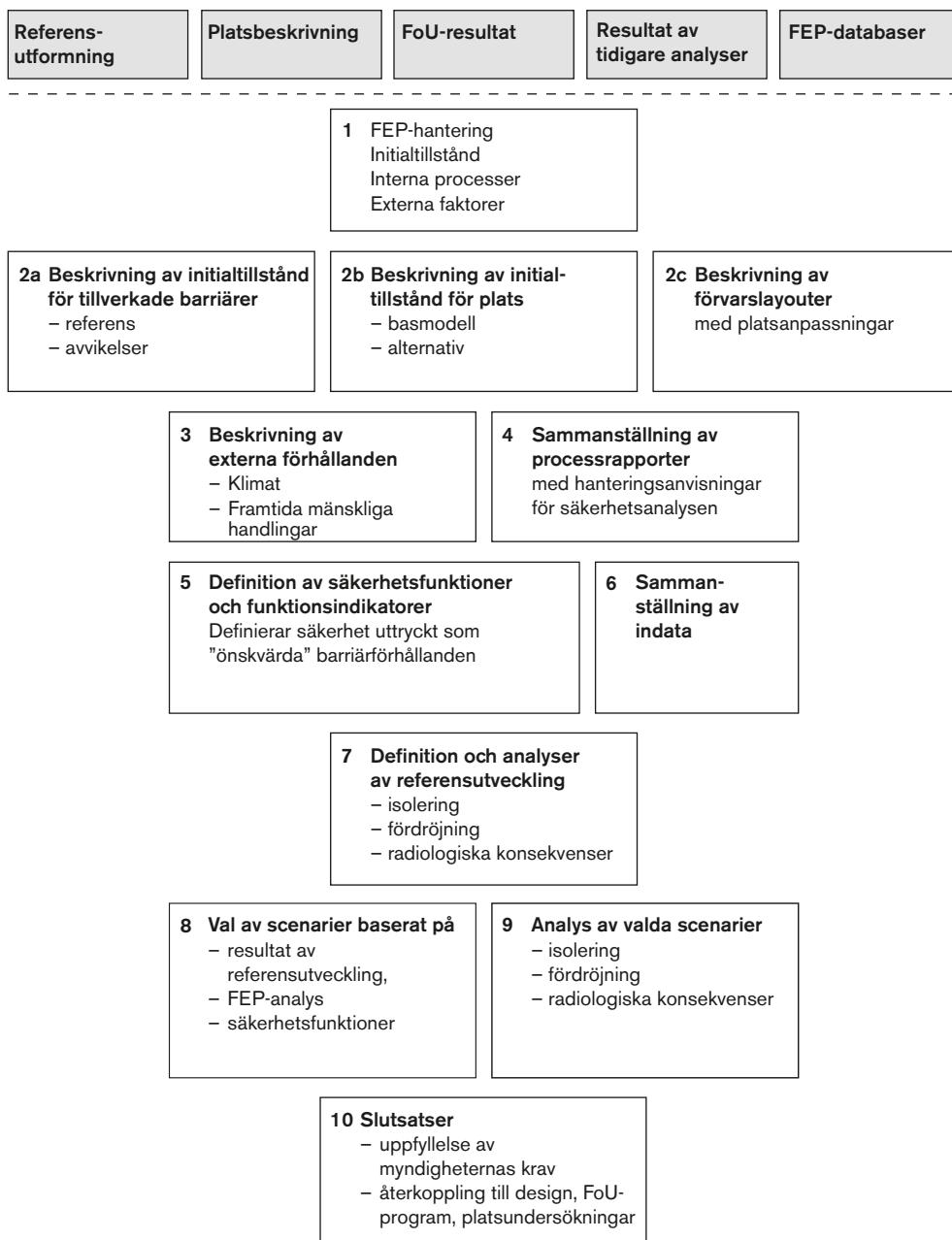
En sammanfattning av initialtillståndet för SR-Can finns i avsnitten 3.3 och 3.4.

3. Beskrivning av externa förhållanden

Faktorer relaterade till externa förhållanden delas in i de tre kategorierna ”klimatrelaterade frågor”, ”storskaliga geologiska processer och effekter” samt ”framtidens mänskliga handlingar”. Hanteringen av dessa faktorer beskrivs i detalj i **Klimatrapparten**, **Geofärprocessrapporten**, respektive **FHA-rapporten**.

Särskilt klimatrelaterade frågor är av stor betydelse vid värderingen av förvarets säkerhet. Förutom det tempererade klimat vi idag har i Sverige förväntas perioder med permafrost och inlandsis samt sådana där förvaret befinner sig under havsnivån. I denna svenska sammanfattning beskrivs detta närmare i referensutvecklingen, kapitel 5 samt i flera av scenarierna i kapitel 6.

² **FEP-rapporten** är en av flera **huvudreferenser** till SR-Can. Tabell 4-1 innehåller en fullständig lista över huvudreferenserna och förklrar nomenklaturen som används för dessa rapporter.



Figur 4-1. Översikt av de tio huvudstegen i säkerhetsanalysen SR-Can. Rutorna ovanför den streckade linjen visar indata till analysen.

4. Beskrivning av processer

Alla kända processer i förvaret av vikt för den långsiktiga utvecklingen beskrivs i särskilda **processrapporter**. Identifieringen av processerna bygger på tidigare analyser och på FEP-hanteringen som beskrivs i steg 1. För varje process dokumenteras kunskapsläget, under vilken tidsperiod den har betydelse, vilka andra processer den är kopplad till och hur processen ska hanteras i säkerhetsanalysen. Vissa processer bedöms kunna försummas, medan många andra studeras med matematiska modeller. Resultaten av sådana modellstudier ligger till grund för beskrivningen av förvarets utveckling på sikt.

5. Definition av säkerhetsfunktioner, säkerhetsfunktionsindikatorer och kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer

Detta steg består av en beskrivning av systemets säkerhetsfunktioner och av hur dessa kan utvärderas med hjälp av en uppsättning säkerhetsfunktionsindikatorer som i princip utgörs av mät- eller beräkningsbara egenskaper hos kapsel, buffert, återfyllning och berg. Säkerhetsfunktionerna och deras indikatorer beskrivs närmare i avsnitt 3.5 ovan.

6. Sammanställning av indata

En fastställd procedur används för att välja data till modellstudier av slutförvarets utveckling och i dosberäkningar. Urvalsprocessen och valda datavärden beskrivs i en särskild **Datarapport**. En flexibel mall för diskussion av osäkerheter i indata har utvecklats och tillämpats.

7. Definition och analys av referensutveckling

En referensutveckling, det vill säga en tänkbar framtida utveckling av förvarssystemet, definieras och analyseras. Ett viktigt tidsperspektiv är tiden för en fullständig istidscykel, vilket är omkring 120 000 år. Systemets isoleringsförmåga över tid analyseras i ett första steg. Denna analys beskriver den allmänna utvecklingen av systemet och en utvärdering av säkerhetsfunktionerna görs. Om utvecklingen leder till att isoleringen bryts analyseras den fördjämmande förmågan hos slutförvaret och dess omgivning och doskonsekvenser beräknas för de långsiktiga förhållanden som identifieras i det första steget. Varje process hanteras i enlighet med de planer som beskrivs i processrapporterna. Data till analyserna tas från **Datarapporten** och de matematiska modeller som används beskrivs sammanfattande i en **Modellrapport**. Referensutvecklingen beskrivs närmare i kapitel 5.

8. Val av scenerier

En uppsättning scenerier väljs för analys. Ett omfattande huvudscenario definieras i enlighet med SKI:s föreskrifter SKIFS 2002:1. Huvudscenariot liknar referensutvecklingen som analyserades i steg 7. Valet av ytterligare scenerier bygger på förvarets säkerhetsfunktioner som definierades i steg 4. I uppsättningen valda scenerier ingår även till exempel scenerier som nämns explicit i tillämpliga föreskrifter, som mänskligt intrång. Se avsnitt 6.2 för en närmare beskrivning av metodiken för scenerieval.

9. Analys av valda scenerier

Huvudscenariot analyseras i första hand genom hänvisning till referensutvecklingen i steg 7. Ytterligare scenerier analyseras genom att man fokuserar på faktorer som skulle kunna leda till situationer där säkerhetsfunktionen i fråga inte upprätthålls. I de flesta fall utförs dessa analyser genom jämförelse med utvecklingen för huvudscenariot. För dessa scenerier, liksom för huvudscenariot, uppskattas ett riskbidrag. Målet är att täcka in alla osäkerheter som inte togs upp i huvudscenariot. Data till analyserna tas från **Datarapporten** och de modeller som används beskrivs i **Modellrapporten**. Se vidare kapitel 6.

10. Slutsatser

Detta steg innefattar sammanställning av resultat från de olika scenarioanalyserna, slutsatser med avseende på säkerhet i relation till myndighetskriterier och återkoppling med avseende på förvarsutformning, fortsatta platsundersökningar och SKB:s Fud-program. Se vidare kapitel 7.

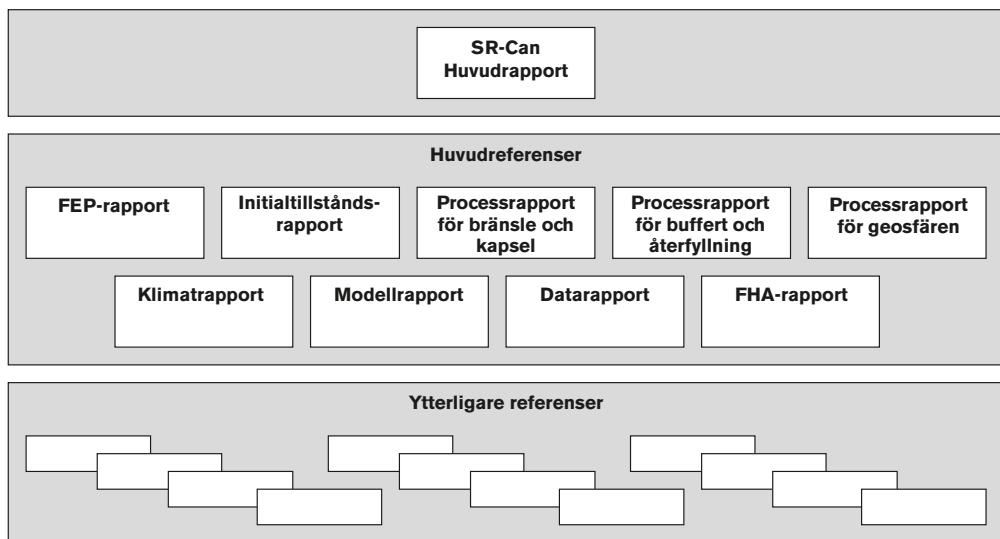
Beskrivningen av metodiken ovan är relativt kortfattad och formell. Flera av momenten i metodiken beskrivs som nämnts mer i detalj i andra avsnitt av denna sammanfattningsrapport som framgår av de inlagda hänvisningarna ovan. I dessa avsnitt beskrivs de olika momenten i sammanhanget där de tillämpas, vilket ofta underlättar förståelsen.

Av metodikbeskrivningen framgår att flera av stegen i säkerhetsanalysen resulterar i specifika rapporter av central betydelse för slutsatserna och analyserna i huvudrapporten. Tabell 4-1 visar dessa huvudreferenser. Det finns också ett stort antal ytterligare referenser som behandlar mer specialiserade frågor och som utgör underlag antingen direkt för huvudrapporten eller för någon av huvudreferenserna. Raporthierarkin illustreras i figur 4-2.

Dessutom utgör, som nämnts i avsnitt 3.4, rapporterna med de platsbeskrivande modellerna för Forsmark och Laxemar fundamentala underlag för säkerhetsanalysen.

Tabell 4-1. Huvudreferenser i SR-Can-projektet. Samtliga rapporter finns tillgängliga på www.skb.se.

Fullständig titel	Svensk förkortning	Rapportnummer
FEP report for the safety assessment SR-Can	FEP-rapport	SKB TR 06-20
Initial state report for the safety assessment SR-Can	Initialtillståndsrapport	SKB TR 06-21
Fuel and canister process report for the safety assessment SR-Can	Processrapport för bränsle och kapsel	SKB TR 06-22
Buffer and backfill process report for the safety assessment SR-Can	Processrapport för buffert och återfyllning	SKB TR 06-16
Geosphere process report for the safety assessment SR-Can	Processrapport för geosfären	SKB TR 06-19
Climate and climate related issues for the safety assessment SR-Can	Klimatrappart	SKB TR 06-23
Model summary report for the safety assessment SR-Can	Modellrapport	SKB TR 06-26
Data report for the safety assessment SR-Can	Datarapport	SKB TR 06-25
Handling of future human actions in the safety assessment SR-Can	FHA-rapport	SKB TR 06-24



Figur 4-2. Rapporthierarkin i SR-Can-projektet. Huvudreferenserna utgör underlag till huvudrapporten. Ytterligare referenser utgör underlag antingen till huvudrapporten eller till huvudreferenserna. Samtliga rapporter i figuren är på engelska och har egentligen engelska titlar.

5 Referensutvecklingen – ett exempel på framtid

Detta kapitel bygger på materialet i kapitlen 9 och 10 i huvudrapporten SR-Can.

5.1 Inledning

En referensutveckling för ett KBS-3-förvar vid platserna Forsmark och Laxemar, som täcker hela analysperioden på en miljon år, studeras för att förstå utvecklingen i stort och för att ge underlag för scenarieval och scenarieanalyser. Målet är att beskriva en rimlig utveckling av förvarssystemet med tiden.

Två varianter av referensutveckling analyseras:

- En basvariant där de yttre förhållandena under den första glaciationscykeln på 120 000 år antas likna dem som rådde under den senaste glaciationscykeln, Weichselistiden. Därefter antas sju upprepningar av samma glaciationscykel täcka hela analysperioden på en miljon år.
- En växthusvariant där det framtida klimatet, och följdaktligen de yttre förhållandena, till en början antas starkt påverkade av mänskligt orsakade utsläpp av växthusgaser.

Analysen genomförs i fyra tidsepoker:

- Förvarets byggnads- och driftfas.
- Den första tempererade perioden efter förslutning.
- Den första glaciationscykeln.
- Tiden efter den första glaciationscykeln, fram till en miljon år.

Inom varje epok studeras utvecklingen till följd av de processer som verkar inom förvaret och den yttre påverkan förvaret utsätts för.

I det följande ges i avsnitt 5.2 en mer fyllig bakgrund till valet av yttre förhållanden för referensutvecklingen. Därefter sammanfattas resultaten för de fyra tidsepokerna för basvarianten i avsnitten 5.3 till 5.6. I avsnitt 5.7 sammanfattas analysen av växthusvarianten av referensutvecklingen.

5.2 Yttre förhållanden

Basvariant

Det går inte att på lång sikt förutsäga framtida klimatutveckling. Det är också mycket svårt att beskriva en utveckling som kan sägas vara den mest sannolika. Det är däremot mycket sannolikt att de analyserade förvarsplatserna på lång sikt kommer att genomgå perioder präglade av vissa bestämda klimattillstånd och alla tillhörande övergångar mellan dem. Referensutvecklingen ska därför innefatta olika perioder av tempererade förhållanden, liksom permafrost och varierande grad av nedisning, samt möjliga övergångar mellan dessa olika klimattyper. En relativt välkänd utveckling, som innehåller alla ovannämnda komponenter, är den som täcks av Weichselistiden och den interglaciala perioden Holocen, det vill säga utvecklingen från cirka 120 000 år sedan till nutid. I SR-Can har rekonstruerade förhållanden för den senaste istiden valts som referensutveckling för klimatrelaterade förhållanden på platserna. Weichselistiden är den bäst kända av alla tidigare glaciationscykler och modellstudier av utvecklingen kan jämföras med tillgänglig geologisk information.

De valda ytter förhållandena ska ses som ett exempel på en trovärdig utveckling under en istid, där klimat och klimatrelaterade processer samverkar på ett realistiskt sätt. Beskrivningen är varken ett försök att förutsäga en sannolik framtid utveckling, eller en ”bästa uppskattning” av en Weichselutveckling, utan en vetenskapligt försvarbar utgångspunkt för analys av klimatets inverkan på slutförvarets säkerhet. Det är bara nödvändigt att täcka in de viktigaste aspekterna av en Weichselistid. Sedan kompletteras referensutvecklingen av tilläggsscenarier som beskriver mera extrema förhållanden, till exempel med tjockare istäcken eller med mer permafrost.

Analysen av utvecklingen inleds med en 1 000 år lång period inom vilken utvecklingen bygger på extrapolering av nuvarande observerade utveckling och trender. Därefter bygger analysen på en rekonstruktion av Weichselistiden, så som den utvecklades från en tidpunkt för 120 000 år sedan till idag. För 120 000 år sedan antas klimatförhållandena ha liknat dem vi upplever idag. Under återstoden av analysperioden, upp till 1 miljon år, antas denna 120 000 år långa glaciationscykel upprepas.

Växthusvariant

Ytterligare en relevant faktor relaterad till framtidens klimatutveckling är inverkan av mänsklig påverkan på klimatet, framförallt genom utsläpp av växthusgaser. Nyligen presenterade studier förutser en mycket lång period av förhållandevis varmt klimat.

Därför analyseras också en växthusvariant av referensutvecklingen. Växthusvarianten inleds med en 50 000 år lång period av tempererat klimat, följt av den första, relativt milda, 70 000 år långa perioden av basvarianten.

Påverkan av naturliga klimatvariationer förutsätts fortsätta tills de utsläppta växthusgaserna, främst koldioxid, har lämnat klimatsystemet, en process som har uppskattats ta upp till 200 000 år.

5.3 Byggnads- och driftfasen

Analyserna av förvarets byggnads- och driftfas, som förväntas pågå under flera decennier, inriktar sig främst på de störningar av mekaniska, hydrologiska och kemiska förhållanden i berget som orsakas av byggande och drift av förvaret. Resultatet av analyserna visar att två fenomen som kan få betydelse för den långsiktiga säkerheten uppkommer till följd av bygge och drift:

- Bildningen av en sprängskadad zon kring deponeringshål och framför allt kring deponerings-tunnlar. En sådan zon skulle kunna utgöra en transportväg för grundvatten och eventuellt radionuklider om den vore omfattande och utgjorde en sammanhangande struktur och inte bara en samling ”återvändsgränder”. Resultaten tyder på att zonen uppkommer men inte är sammanhangande. Analyser av bergets transportegenskaper på riktigt lång sikt visar att också en sammanhangande zon skulle ha mycket begränsad betydelse för säkerheten.
- Kanalbildung i bufferten, det vill säga bildning av öppna kanaler omedelbart efter depo-nering på grund av de höga grundvattentrycken i det öppna förvaret. Kanalbildungen kan i sin tur medföra erosion av den deponerade bufferten, när vatten strömmar genom kanalerna. Fenomenet har observerats i laboratoriet och i fältförsök. Det upphör då förvaret efter en tid vattenmättats. Analyserna i SR-Can visar att fenomenet som mest kan leda till förlust av något hundratals kilo buffertlora av de cirka 20 ton som finns i varje deponeringshål. Analyserna visar också att en sådan förlust ensam inte har någon påverkan på säkerheten, men förlusten måste ”bokföras” och läggas till eventuella förluster av andra orsaker under senare delar av förvarets utveckling.

5.4 Den första tempererade perioden

Denna period förväntas vara i flera tusen år. Förvarsberget och de återfylda tunnlarna förväntas bli vattenmättade och den efterföljande utvecklingen i berget karakteriseras av återgång till det naturliga, ostörda tillståndet före brytning. Analysen av denna period innehåller termisk, hydrogeologisk, mekanisk och kemisk modellering.

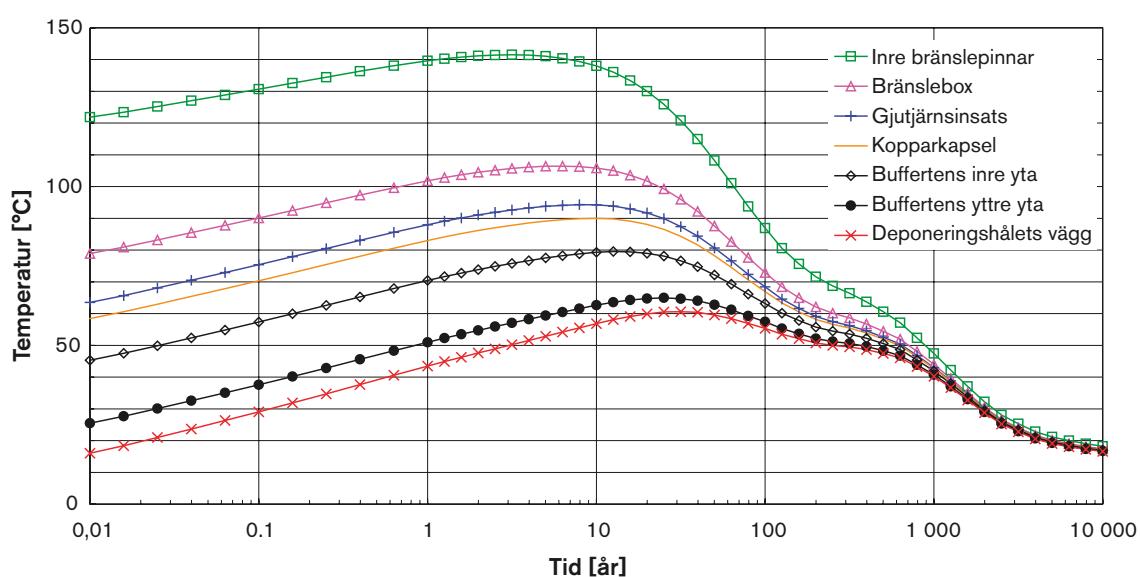
Efter deponering av kapslar och buffert samt återfyllning av deponeringstunnlarna kommer förvaret att mättas med vatten. Tiden för detta förlopp beror på de hydrogeologiska förhållandena i förvarsberget. Stora skillnader i återmättnadstakten kan förväntas mellan förvarets olika delar. Tiden för återmättnad av berget och deponeringstunnlarna beräknas bli upp till 50 år, och för bufferten som mest något hundratals år i Forsmark. I Laxemar är tiderna kortare. Mot slutet av vattenmättnadsförloppet sväller bufferten och kommer därfter att utöva ett avsevärt svälltryck mot kapseln och det omgivande berget. Under mättnadsförloppet kan svällningen vara ojämnn, det vill säga olika delar av kapseln utsätts för olika tryck. Kapseln är dock dimensionerad för att med god marginal klara dessa påfrestningar.

Parallelt med vattenmättnadsförloppet kommer förvaret att värmes upp av resteffekten hos det använda bränslet. Figur 5-1 visar resultatet av en beräkning av utvecklingen av temperaturen i olika delar av ett deponeringshål för ett förvar i Forsmark.

Den maximala temperaturen i kopparkapseln (cirka 90 °C) och på buffertens inneryta (cirka 80 °C) uppnås efter omkring 10 år. Vid denna beräkning har man antagit att bufferten inte mättats med vatten, vilket är pessimistiskt eftersom dess förmåga att leda bort värme ökar med vattenhalten. Å andra sidan förväntas ju enligt ovan att det tar betydligt längre tid än 10 år att vattenmätta många deponeringshål. Enligt avsnitt 3.5.2 bör buffertens temperatur ligga under 100 °C, vilket alltså uppnås med god marginal.

Av figuren framgår också att det tar mer än tusen år innan temperaturen i förvarsberget återgår till den som rådde före deponering.

En viktig säkerhetsrelaterad fråga med långsiktiga konsekvenser är huruvida uppvärmningen av berget kan leda till spänningar och sprickbildning av berget allra närmast deponeringshålen. Fenomenet kallas termisk spjälknning. Effekten av en sådan spjälknning blir att ämnen som finns lösta i grundvattnet i större utsträckning överförs till bufferten. Detta har betydelse för säkerheten eftersom en del sådana ämnen kan skada kapseln genom korrasjon. Om en kapsel



Figur 5-1. Den termiska utvecklingen i och ikring ett deponeringshål i Forsmark.

skulle skadas blir också överföringen av eventuella radionuklidor mellan buffert och berg mer effektiv. I SR-Can dras slutsatsen att termisk spjälkning inte kan uteslutas. Därför inkluderas effekten av detta i beräkningar av kapselkorrosion och radionuklidtransport.

I övrigt bedöms inga säkerhetsrelaterade egenskaper påverkas negativt av utvecklingen under den första tempererade perioden av referensutvecklingen. Bedömningen är därför att inga kapslar skadas under denna epok.

5.5 Den första glaciationscykeln

Den första tempererade perioden förväntas vara i flera tusen år efter förslutning. Nästa tidsepok i referensutvecklingen är den första istidscykeln som förväntas sträcka sig fram till 120 000 år efter förslutning. Den karakteriseras av perioder av permafrost och glaciala förhållanden med mellanliggande perioder av tempererat klimat.

5.5.1 Modellstudier av inlandsisar och permafrost

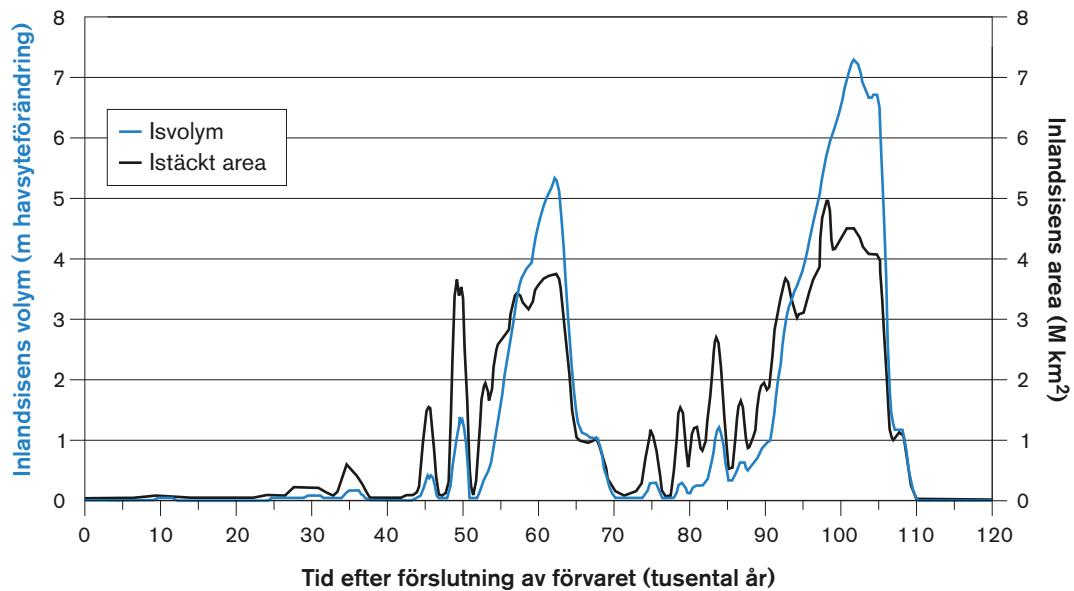
Förekomst av permafrost och glaciala förhållanden studeras med hjälp av en modellrekonstruktion av förhållandena under den senaste glaciationscykeln. Den innehåller Weichselistiden och den nuvarande interglaciale perioden Holocen. Under denna period sker stora förändringar på ytan och även av vissa förhållanden i berget som har betydelse för förvarets säkerhet, framför allt:

- Utveckling av permafrost.
- Förändrad mekanisk belastning på berget på grund av ett överliggande istäcke som förändrar spänningsfördelningen i berget och eventuellt skapar större jordskalv.
- Ökade grundvattentryck på förvarsnivå under glaciala förhållanden.
- Förekomsten av jonfattigt grundvatten under glaciala förhållanden vilket kan orsaka erosion av buffert och återfyllning. Detta skulle i sin tur öka kapselkorrosionen.
- Möjlig nedrängning av syre till förvarsdjup under kortare perioder av ökat grundvattenflöde under glaciala förhållanden.

Förvaret påverkas i huvudsak av klimatrelaterade processer såsom tillväxt av inlandsisar och permafrost samt av strandlinjeförskjutning, medan klimatet som sådant vid ytan ovan förvaret är av mindre betydelse. För att generera referensutvecklingen, med dess tidsserie av olika klimat tillstånd, har tre olika modeller använts; en inlandsismodell, en modell som simulerar jordskorpanas nedtryckning och havsnivåns förändring till följd av isutvecklingen, samt en permafrostmodell. Detaljer om modellerna hittas i **Klimatrapperten** och i **Modellrapporten**. Basen för rekonstruktionen av Weichselperioden är en simulering av inlandsisen med inlandsismodellen. Den beräknade utvecklingen hos inlandsisen har sedan använts som indata till de andra modellerna.

När inlandsisen simuleras används en temperaturkurva för Weichselperioden framtagen från mätningar av prover av den grönländska inlandsisen. Temperaturkurvan används för att rekonstruera temperatur och nederbörd över Norden under Weichselistiden. Modellen genererar sedan successiva perioder av tillväxt och avsmältning av en inlandsis, se figur 5-2 och figur 5-3. Även kända daterade israndlägen under Weichselperioden används som indata till modellen för att få ett mer realistiskt resultat. Resultaten visar att inlandsisen i rekonstruktionen av Weichsel växte till i ett antal faser, med mellanliggande perioder mer begränsad isutbredning. Weichselisen nådde sin största storlek för omkring 18 000 år sedan, vilket motsvarar en tidpunkt cirka 103 000 år in i den framtida referensutvecklingen, se figur 5-2 och figur 5-3.

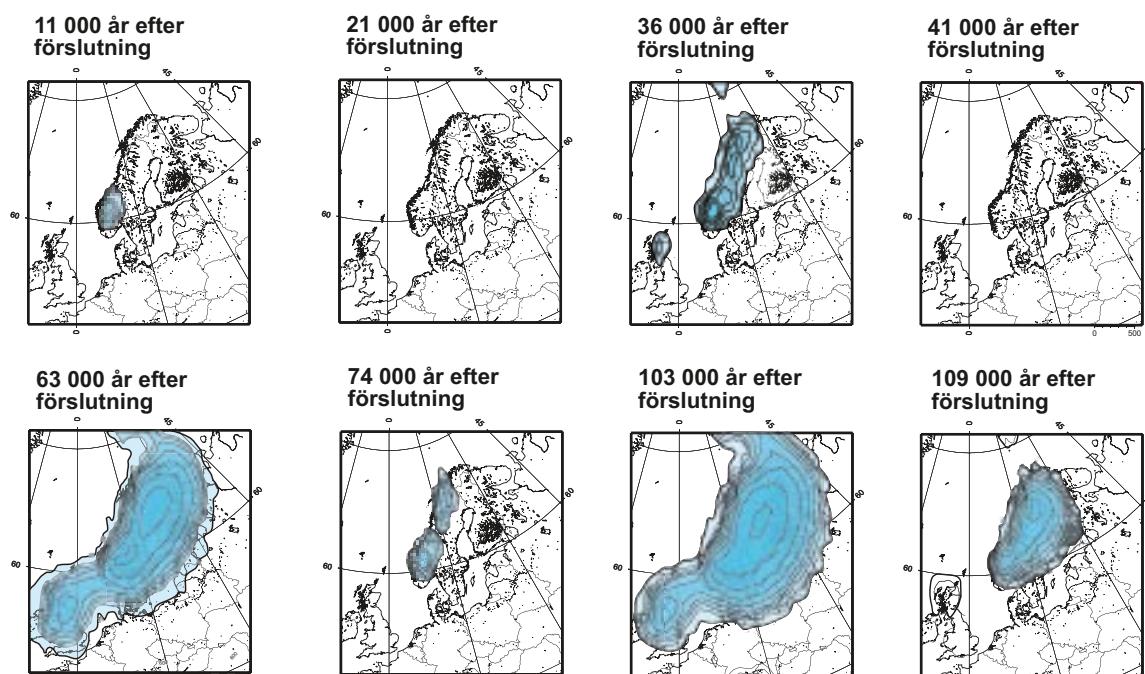
Resultaten visar att den största istjockleken i denna rekonstruktion är cirka 2 900 meter för Forsmark och cirka 2 400 meter för Laxemar. Det motsvarar ett extra grundvattentryck på 26 MPa för Forsmark och 22 MPa för Laxemar.



Figur 5-2. Inlandsisens area och volym under en glacial cykel, baserat på en rekonstruktion av inlandsisen under Weichselperioden.

Strandlinjeförskjutningen för Forsmark och Laxemar extraheras ur resultat från den modell som beskriver hur jordskorpanas läge och havsytans nivå förändras globalt, till följd av uppbyggnaden och avsmältningen av inlandsisar.

I anslutning till att klimatet blir kallare under en glacial cykel förväntas permafrost, det vill säga mark där temperaturen befinner sig under 0 °C under hela året, växa till vid platserna. Detta har simulerats med en permafrostmodell och platsspecifik information om bland annat berggrundens termiska egenskaper och geotermiskt värmeflöde. Även klimatutvecklingen och utvecklingen av havsnivån vid de två platserna har använts i dessa beräkningar. Permafrost kan även förekomma under en inlandsis, vilket är fallet under vissa perioder i referensutvecklingen.



Figur 5-3. Exempel på isutbredningar under en glacial cykel, baserat på rekonstruktionen av inlandsisen under Weichselperioden.

I dessa fall är det vanligt att inlandsisen isolerar markytan från det kalla klimatet i en sådan omfattning att permafosten under inlandsisen så småningsom smälter av.

Resultaten från permafrostsimuleringarna visar att det största permafostdjupet i referensutvecklingen är cirka 250 meter vid Forsmark och cirka 160 meter vid Laxemar. I referensutvecklingen når -5°C isotermen (den temperatur där bufferten fryser) ett djup av cirka 100 meter vid Forsmark och cirka 60 meter vid Laxemar.

Figur 5-4 visar den sammanvägda bilden av hur istjocklek, strandlinjeförskjutning och permafrost utvecklas vid platserna under 120 000 år i referensutvecklingen.

I figur 5-4 ses att båda platserna utsätts för två huvudsakliga perioder av nedisning i referensutvecklingen. Den första startar cirka 60 000 år in i framtiden och den andra vid cirka 90 000 år.

I samband med att inlandsisar avancerar eller retirerar kan en ökning av antalet jordskalv förkomma. Under de nedisade perioderna sker smältning vid botten av inlandsisen, och därmed även grundvattenbildning med jonfattigt glacialsmältvatten, under de perioder som är markerade med *basal smältning* i figur 5-4. Före de glaciala perioderna utsätts båda platserna för omfattande permafrost.

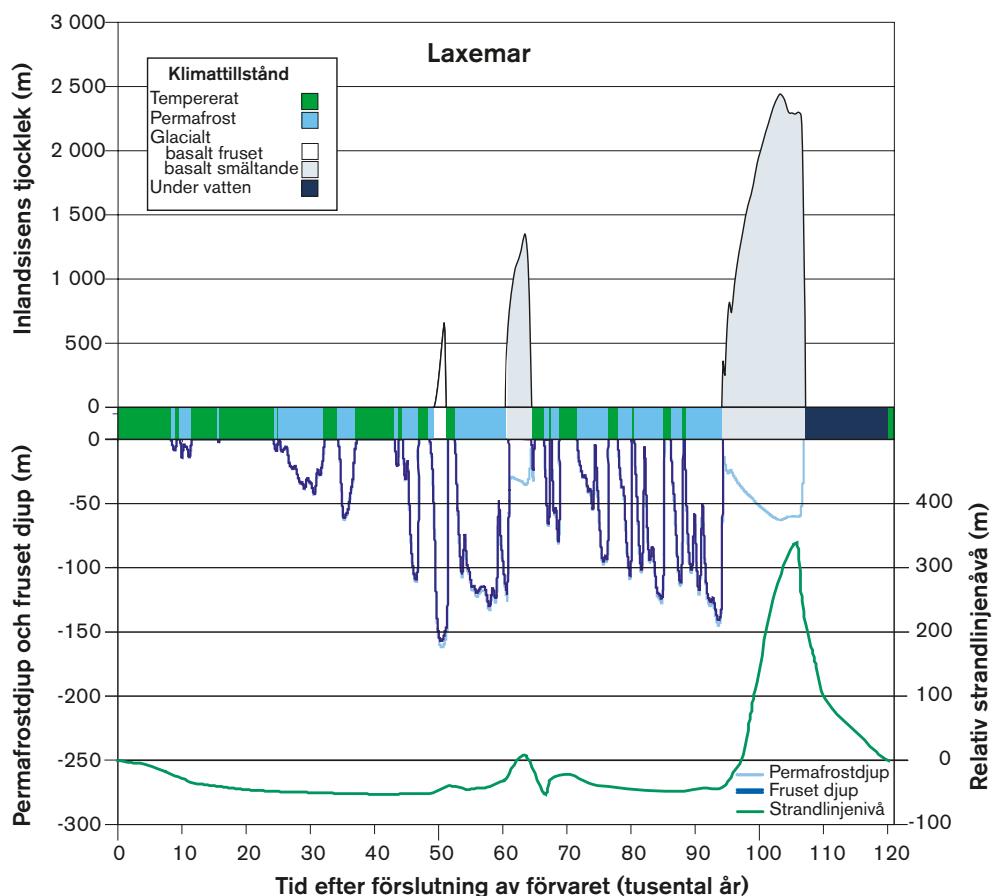
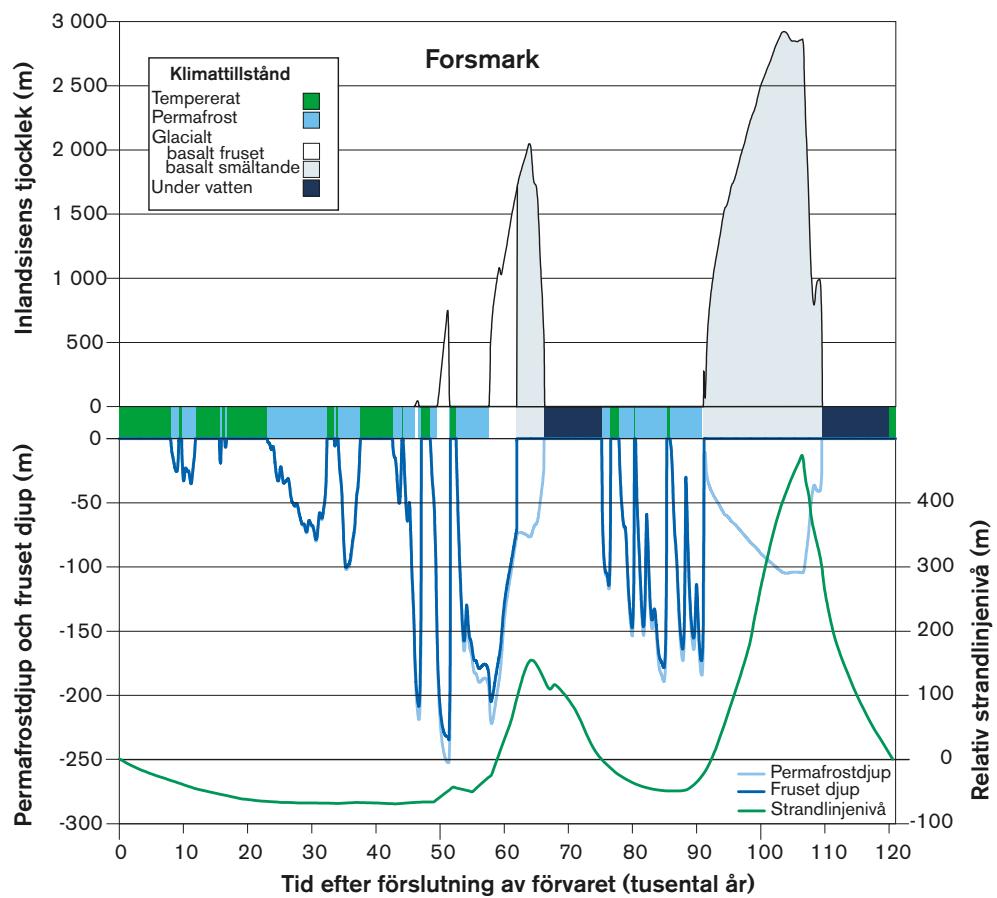
På grund av olika geografiska lägen och olika egenskaper hos berggrunden är inlandsisen något tjockare och permafosten djupare vid Forsmark än vid Laxemar. En annan skillnad mellan platserna är att Forsmark har en extra period då platsen ligger under Östersjöns nivå, runt 70 000 år in i framtiden, på grund av den tjockare inlandsisen.

5.5.2 Konsekvenser för förvarets säkerhet

Konsekvenserna av de yttersta förhållandena under den första glaciala cykeln för förvarets säkerhet och då i första hand kapselns isolerande förmåga studeras utförligt i referensutvecklingen i SR-Can. En lång rad modellstudier av hydrologiska, mekaniska och kemiska förlopp ger en bild av hur berg, buffert och kapsel påverkas av de föränderliga yttersta förhållandena. Eftersom samma studier återkommer, fast ofta för mer extrema förhållanden i analysen av scenarierna i kapitel 6, ges här bara en sammanfattning av de viktigaste resultaten för säkerheten.

Analysresultaten visar i sammanfattning följande vad gäller säkerheten under den första 120 000-åriga glaciala cykeln i referensutvecklingen:

- Bufferten fryser inte till följd av bildningen av permafrost vid förvarsplatserna. Denna fråga behandlas utförligare och för mer extrema situationer i ett speciellt scenario i avsnitt 6.3.
- Bufferten omvandlas inte nämnvärt till material med mindre gynnsamma egenskaper till följd av utvecklingen under den första glaciala cykeln. Denna fråga behandlas utförligare i ett speciellt scenario i avsnitt 6.5.
- Utspädda grundvatten med låg salthalt kan förekomma under långa perioder när glaciala förhållanden råder. Detta kan leda till förlust av buffertmaterial i några deponeringshål, i extrema fall så mycket att advektiva förhållanden uppstår, det vill säga bufferten hindrar inte längre grundvattenflöde genom deponeringshålet. Denna fråga behandlas utförligare i ett speciellt scenario i avsnitt 6.6.
- Om bufferten är intakt blir effekterna av korrosion på kopparkapseln försumbara. Om så mycket buffert förloras att advektiva förhållanden uppkommer leder detta till ibland kraftigt ökad kapselkorrosion, men inga kapselbrott förväntas under den första glaciationscykeln. Denna fråga behandlas utförligare och för mer extrema situationer i ett speciellt scenario i avsnitt 6.7.
- Kapseln skadas inte av de förhöjda grundvattentryck som förväntas på förvarsdjup då inlandsisar täcker förvaret. Denna fråga behandlas utförligare och för mer extrema situationer i ett speciellt scenario i avsnitt 6.8.



Figur 5-4. Utveckling hos viktiga klimatrelaterade faktorer vid Forsmark och Laxemar för referensutvecklingen.

- Större jordskalv, med magnitud 6 eller större, i närheten av förvaret är mycket osannolika men kan inte uteslutas helt. Om ett sådant skalv skulle inträffa, bedöms i värsta fall någon enstaka kapsel kunna skadas. De beräknade konsekvenserna av en sådan skada ligger i referensutvecklingen långt under myndigheternas riskgräns. Denna fråga behandlas utförligare i ett speciellt scenario i avsnitt 6.9.

5.6 Tiden efter den första glaciationscykeln, fram till en miljon år

Den vidare utvecklingen av förvarssystemet analyseras genom att man antar ytterligare sju upprepningar av den 120 000 år långa Weichselistiden.

Samma fenomen som för den första glaciationscykeln skulle kunna inverka menligt på säkerheten under framtida glaciationscykler:

- Omfattningen av buffertförlust på grund av erosion förväntas öka med tiden. Detta leder till ökad kapselkorrosion, vilket kan medföra haveri av ett fåtal kapslar under analysperioden på en miljon år. Resultatet påverkas av många faktorer som analyseras i referensutvecklingen. De beräknade konsekvenserna ligger också i ett miljonårsperspektiv under myndigheternas riskgräns för både Forsmark och Laxemar. Som nämnt ovan behandlas denna fråga mer utförligt i ett speciellt scenario i avsnitt 6.7.
- Sannolikheten för att större jordskalv ska ha inträffat ökar med tiden. De beräknade konsekvenserna ligger också i ett miljonårsperspektiv väl under myndigheternas riskgräns för både Forsmark och Laxemar. Som nämnt ovan behandlas denna fråga mer utförligt i ett speciellt scenario i avsnitt 6.9.

Analysresultaten pekar inte på att några andra säkerhetsfunktioner hotas.

5.7 Växthusvarianten

I växthusvarianten antas ett tempererat klimat råda under 50 000 år, innan den relativt milda starten av basvarianten av nästa glaciationscykel inträder. Detta i stället för bara några tusen år av initiala tempererade förhållanden, vilket är fallet i basvarianten, det vill säga utan en ökad växthuseffekt. I hela rapporten gäller implicit att växthusvarianten beskriver en situation med *ökad* växthuseffekt.

Som framgår ovan är de mest negativa processerna för förvarets säkerhet relaterade till glaciala förhållanden. Därför är en förlängd period av tempererat klimat i växthusvarianten i princip gynnsam för förvarets säkerhet.

5.8 Radiologiska konsekvenser för referensutvecklingen

Radionuklidtransport och dosberäkningar utförs för fyra typer av kapselbrott i SR-Can. Två av dessa, orsakade av korrosion och respektive skjuvrörelser, härrör från analysen av referensutvecklingen. Ytterligare två hypotetiska skadetyper analyseras för att illustrera fördräjning, förvarets sekundära säkerhetsfunktion.

En stor uppsättning beräkningar görs för att analysera fördräjning och för att klargöra konsekvenserna av många osäkerheter som identifieras i referensutvecklingen. I biosfären uppskattas radionuklidtransport och doskonsekvenser med en ny metod som är baserad på platsspecifika biosfärdata och som tar hänsyn till landskapets utveckling med tiden.

Resultaten anger att eventuella kapselbrott som följd av *referensutvecklingen* medför konsekvenser som ligger väl under myndigheternas riskgränser. Mer om detta i scenarieanalyserna i kapitel 6.

6 Scenarierna – kan säkerhetsfunktionerna slås ut?

Detta kapitel bygger på materialet i kapitlen 11 (scenarieval) och 12 (scenarieanalyser) i huvudrapporten SR-Can.

6.1 Inledning

Säkerhetsanalysen handlar ju om att utröna huruvida förvaret förblir långsiktigt säkert, trots de förändringar som uppträder. Enligt metodiken som beskrivs i kapitel 4 studeras först en referensutveckling som kan sägas utgöra ett typiskt exempel på förvarets utveckling med tiden. Referensutvecklingen, kapitel 5, ligger till grund för ett huvudscenario. Utvecklingen rymmer många osäkerheter och det är svårt att täcka in alla i referensutvecklingen/huvudscenariot. Därför studeras också ett antal ytterligare scenarier som har till syfte att säkerställa att alla osäkerheter täcks in. Metoden för val av scenarier beskrivs i avsnitt 6.2. Vart och ett av scenarierna i SR-Can beskrivs och analyseras sedan i avsnitten 6.3 till 6.10. Resultaten sammanfattas i avsnitt 6.11 där också kombinationer av scenarier diskuteras kortfattat. Slutligen analyseras i avsnitt 6.12 ett antal hypotetiska fall där en eller flera av förvarets barriärer tänks helt borttagna.

6.2 Val av scenarier

Om samtliga de säkerhetsfunktioner som beskrivs i avsnitt 3.5 upprätthålls förblir per definition alla kapslar tätta och förvaret är därmed säkert i betydelsen att inga utsläpp av radionuklidor förkommer. Efter att säkerhetsfunktionerna lagts fast kan därför säkerhetsanalysen sägas bestå i att utröna huruvida en eller flera säkerhetsfunktioner under några omständigheter kan tänkas sättas ur spel – helt eller delvis. Tidsperspektivet är en miljon år fram i tiden efter förvarets förslutning.

Säkerhetsfunktionerna användes i SR-Can till att formulera ett antal kritiska frågor kring förvarets säkerhet:

- Kan bufferten frysa?
- Kan bufferten försvinna?
- Kan buffertleran omvandlas till ett material med ogynnsamma egenskaper?
- Kan kapseln korrodera sönder?
- Kan kapseln skadas av trycket från den svällande bentonitleran och av grundvattentrycket på förvarsdjup?
- Kan kapseln skadas av jordskalv?

Var och en av dessa utreds i ett eget *scenario*. I analysen av scenariot granskas alla sätt på vilken säkerhetsfunktionen i fråga kan tänkas brytas. Målet är att svara på frågan: Finns det någon rimlig möjlighet att detta scenario skulle kunna inträffa? Om så visar sig vara fallet tas konsekvenserna av scenariot i fråga med i en risksummering för förvaret. I annat fall betraktas scenariot som ett ”restscenario”, och konsekvenser kan analyseras som illustration, för att belysa betydelsen av att just den säkerhetsfunktionen upprätthålls.

Ett scenario med kapselbrott på grund av övertryck får exemplifiera angreppssättet. Kapslarna utsätts i förvaret för tryck från den svällande buffertleran samt för grundvattnets tryck som under en inlandsis ökar väsentligt. Frågan är om de lastbärande kapselinsatserna under alla förhållanden motstår dessa tryck. I analysen av referensutvecklingen blev resultatet av analyserna att denna form av kapselhaveri inte förekommer. Kapselinsatserna antogs vara tillverkade enligt referensmetoden, bufferten antogs ha de egenskaper som krävs i referensutformningen av förvaret och de maximala grundvattentrycken antogs motsvara de som bedömdes vara maximala under den senaste glaciala cykeln, Weichselistiden. I analysen av scenariot som hanterar kapselbrott på grund av övertryck beaktas missöden vid tillverkningen av de lastbärande kapselinsatserna, svälltryck som överstiger referensvärdena för bufferten samt extremt kraftiga istäckan som ger högre grundvattentryck, se vidare avsnitt 6.8.

Inte alla säkerhetsfunktioner i avsnitt 3.5 har ett eget scenario. Detta beror på att säkerhetsfunktionerna så som de definieras i avsnitt 3.5 till viss del är överlappande. Detaljer kring detta finns att läsa i huvudrapporten SR-Can, kapitel 11.

En viktig fråga i detta sammanhang är huruvida uppsättningen scenarier är tillräckligt omfattande för att ge en allsidig belysning av säkerhet och risker. Metoden för scenarievalet och de påföljande scenarieanalyserna baserar sig på *både* referensutvecklingen – där alla processer och kopplingar mellan processer av betydelse för förvarets säkerhet tas med – *och* den tillbakablickande analysen av huruvida alla osäkerheter verkligen tagits om hand på ett adekvat sätt då scenarierna studeras med säkerhetsfunktionerna i fokus. Därigenom uppnås ett slags dubbel kontroll av att alla aspekter av relevans för säkerheten verkligen tagits med i valet av scenarier. Scenarievalet i en säkerhetsanalys är dock i någon mån alltid subjektivt och det är svårt att på ett matematiskt och logiskt stringent sätt argumentera för fullständigheten i scenarievalet.

Förutom scenarierna som tagits fram på detta sätt kan scenarier som krävs av myndighetsföreskrifter eller som av andra skäl bedöms som relevanta inkluderas. Detta ledde till att ett antal scenarier relaterade till framtidens mänskliga handlingar inkluderades i SR-Can. Dessa är restscenarier, det vill säga de ska enligt SSI:s föreskrifter inte ingå i risksummeringen. Tabell 6-1 ger en översikt av valda scenarier i SR-Can.

I de följande avsnitten gårs de valda scenarierna igenom ett efter ett och därefter utreds kort kombinationer av scenarier i avsnitt 6.11.

6.3 Huvudscenariot

Huvudscenariot är nästan identiskt med referensutvecklingen och beskrevs alltså i kapitel 5. Den viktigaste skillnaden är att kapselskador till följd av jordskalv utesluts i huvudscenariot, eftersom sådana skador bedöms ha en låg sannolikhet. De tas i stället om hand i ett särskilt scenario, som beskrivs i avsnitt 6.9 nedan.

I slutsatserna för referensutvecklingen i avsnitt 5.6 konstaterades att kapselskador kan tänkas uppstå för tiden bortom 100 000 år till följd av att bufferten förloras. Det rör sig som mest om ett fåtal kapslar där kopparhöljet penetreras på grund av den ökade korrasionen till följd av att den skyddande bufferten förlorats. I avsnitt 6.7 nedan utreds detta fall vidare och konsekvenserna visas för både referensutvecklingen/huvudscenariot och mer pessimistiska fall som ger en uttömmande behandling av osäkerheter.

Tabell 6-1. Resultat av scenarievalet. Gröna rutor anger förhållanden för basvarianten av huvudscenariot, röda anger avvikeler från dessa förhållanden. EBS (Engineered Barrier System) betecknar tillverkade barriärer och andra tillverkade förvaringsdelar, det vill säga kapseln, bufferten och deponeringstunneln.

Huvudscenario				
Namn	Initialtillstånd EBS	Initialtillstånd plats	Process- hantering	Hantering av externa förhållanden
Basvariant	Referens ± toleranser	Platsbeskrivande modell v. 1.2 (med varianter/ osäkerheter)	Enligt process- rapporter	Referensklimat (upprepningar av Weichselistiden). Inga framtida mänskliga handlingar (FHA).
Växthus- varianten	Referens ± toleranser	Platsbeskrivande modell v. 1.2 (med varianter/ osäkerheter)	Enligt process- rapporter	Förlängd tempererad period. Inga framtida mänskliga handlingar (FHA).
Ytterligare scenarier baserade på potentiell förlust av säkerhetsfunktioner ("mindre sannolika" eller "restscenarier" beroende på analysresultatet)				
Namn	Initialtillstånd EBS	Initialtillstånd plats	Process- hantering	Hantering av externa förhållanden
Advektion i bufferten	Utvärdera osäkerheter för relevanta initialtillståndsfaktorer, inre processer och externa förhållanden som skulle kunna leda till förlust av den aktuella säkerhetsfunktionen. Analysen av huvudscenariot utgör utgångspunkt.			
Buffert- frysning	Se ovan			
Buffert- omvandling	Se ovan			
	Beakta var och ett av de tre bufferttillstånden ovan + intakt buffert, för analys av de tre kapselscenarierna nedan			
Kapselbrott på grund av isostatisk last	Utvärdera osäkerheter för relevanta initialtillståndsfaktorer, inre processer och externa förhållanden som skulle kunna leda till förlust av den aktuella säkerhetsfunktionen. Analysen av huvudscenariot utgör utgångspunkt.			
Kapselbrott på grund av skjuvrörelse	Se ovan			
Kapselbrott på grund av korrosion	Se ovan			
Scenarier relaterade till framtida mänskliga handlingar				
Namn	Initialtillstånd EBS	Initialtillstånd plats	Process- hantering	Hantering av externa förhållanden
Intrång genom borrning	Som bas- varianten av huvudscenariot	Som bas- varianten av huvudscenariot	Som bas- varianten av huvudscenariot, utom processer som påverkas av borrhning	Referensklimat + borrhning
Ytterligare intrångsfall, till exempel näraliggande brytningsplats	Som bas- varianten av huvudscenariot	Som bas- varianten av huvudscenariot	Som bas- varianten av huvudscenariot, utom processer som påverkas av intrång	Referensklimat + intrång
Ej förslutet förvar (analyseras inte i SR-Can)	Som bas- varianten av huvudscenariot, men ofullständig förslutning.	Som bas- varianten av huvudscenariot	Som bas- varianten av huvudscenariot, modifierad beroende på initialtillstånd	Referensklimat

6.4 Kan bufferten frysa?

Om vattnet i bufferten skulle frysa skulle bufferten kunna komma att utöva ett mycket högt tryck på omgivande berg och kapsel, ungefär på samma sätt som vatten som fryser i en glasflaska kan spränga flaskan. Det är därför viktigt att reda ut huruvida detta kan ske i ett slutförvar.

Också återfyllningen i deponeringstunneln från vilken kapselns deponeringshål är borrade och även andra återfyllda utrymmen i förvaret kan tänkas frysa, men detta är mindre allvarligt eftersom det inte får några direkta konsekvenser för kapseln.

De faktorer som styr om bufferten fryser är:

- Temperaturen vid ytan, både vid den aktuella tidpunkten och historiskt.
- Huruvida bergytan är täckt av isolerande lager av snö, is eller vegetation.
- Bergets värmeförmedlingsförmåga.
- Förvarsdjupet (400 meter i Forsmark och 500 meter i Laxemar).
- Värmeflödet från jordens inre.
- Värmeavgivningen från bränslet.
- Buffertens frystemperatur (-5°C).

Förutsättningarna för buffertfrysning har studerats dels i referensutvecklingen (huvudscenariot) där rimliga antaganden görs beträffande samtliga dessa faktorer, dels i ”buffertfrysningsscenario” där man utreder konsekvenserna av mer extrema antaganden.

I referensutvecklingen antas de yttersta förhållandena vara en upprepning av den senaste glacialsyklonen, Weichselistiden med dess perioder av tempererade förhållanden, permafrost och inlandsis vid platserna eller situationer där platsen befinner sig under havsytan. Ett förvar i Forsmark är mer utsatt än ett i Laxemar, dels eftersom bergets värmeförmedlingsförmåga är högre i Forsmark så att kylningen från ytan vid permafrostförhållanden blir mer effektiv, dels eftersom det tänkta förvarsdjupet i Forsmark är 400 meter mot 500 meter i Laxemar i SR-Can. Slutsatserna från analysen av referensutvecklingen är att frysning av bufferten med god marginal undviks vid båda platserna. I Forsmark blir det -5°C (buffertens frystemperatur) eller kallare ned till ett djup av cirka 100 meter och i Laxemar till ett betydligt mindre djup.

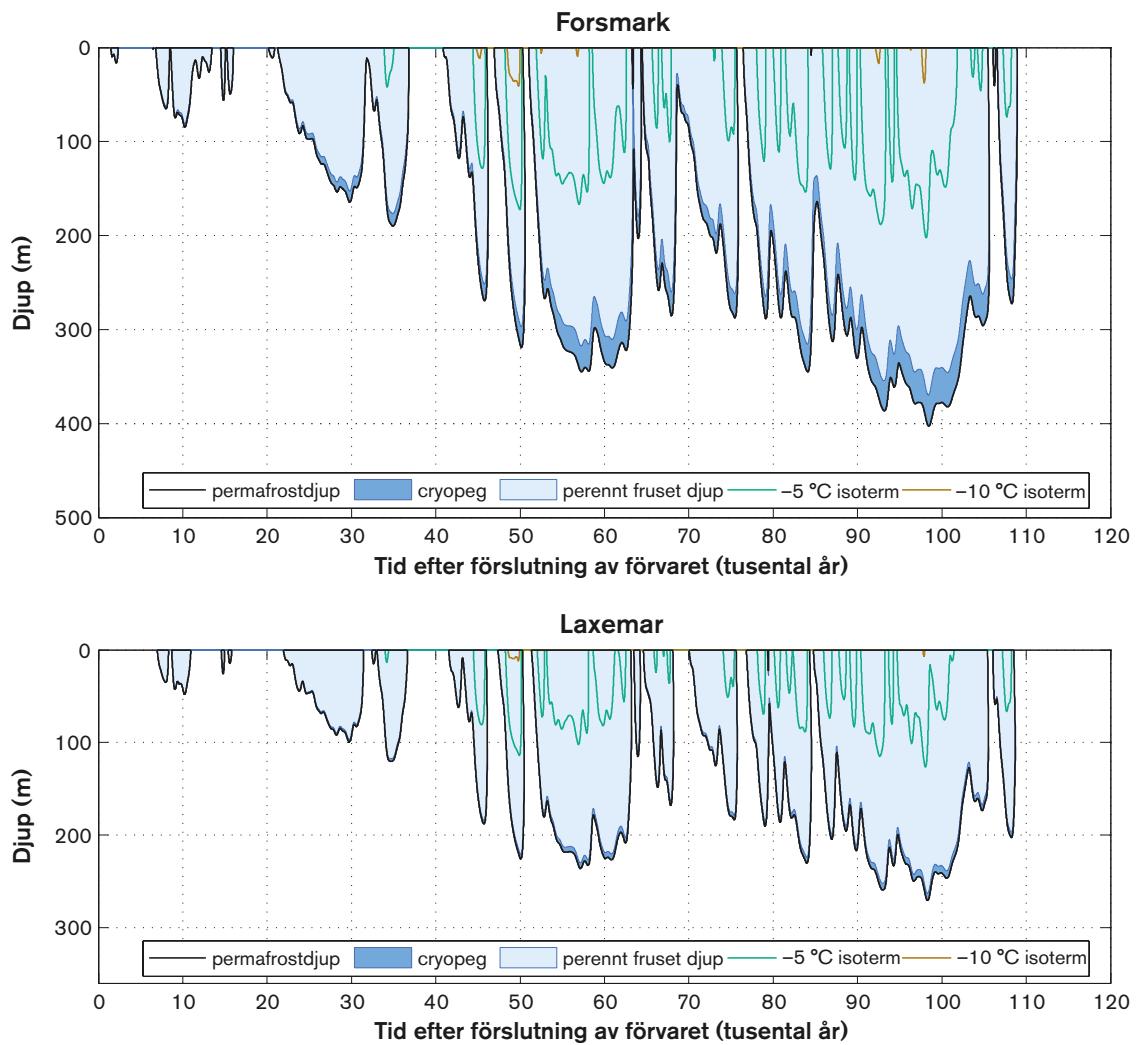
I buffertfrysningsscenario antas de yttersta förhållandena vara sådana att de gynnar frysning av bufferten. Klimatet antas vara kallt och extremt torrt så att berget inte täcks av snö, inlandsis eller vatten. Dessutom bortses från värmeförmedlingen från bränslet. Också för detta scenario är slutsatsen att buffertfrysning undviks vid båda platserna. Vid Forsmark blir det -5°C eller kallare ned till ett djup av cirka 200 meter och i Laxemar till cirka 130 meter, se figur 6-1.

Den övergripande slutsatsen kring frysning av bufferten i SR-Can är därför att detta kan uteslutas, också för extrema antagande kring framtidens klimat.

Även situationen att bufferten gått delvis förlorad så att ett hålrum som fyllts med vatten uppstått har analyserats. Det kan inte helt uteslutas att vattnet i ett sådant hålrum skulle frysas, men analyserna visar att påfrestningen på kapseln inte blir så stora att kapseln skadas.

6.5 Kan bufferten omvandas kemiskt?

Buffertmaterialet är noggrant utvalt för att ha gynnsamma egenskaper för förvarets säkerhet vilket bland annat betyder att materialet måstestå den miljö förvaret erbjuder utan att dessa egenskaper går förlorade. Det är därför viktigt att reda ut vilka påfrestningar materialet kommer att utsättas för.



Figur 6-1. Beräknat permafrostdjup (0°C isolerm), och djupet för -5°C och -10°C isolermerna vid Forsmark och Laxemar för ytterre förhållanden som är exceptionellt gynnsamma för uppkomsten av permafrost.

Det är känt att det speciella mineral buffertleran är uppbyggd av kan omvandlas vid höga temperaturer. Förvaret är därför dimensionerat så att bufferten inte ska ”överhettas”. Kravet är att leran inte utsätts för högre temperaturer än 100°C . Detta är ett strängt satt krav eftersom omvandling observerats först vid betydligt högre temperaturer.

Ett annat krav är att grundvattnets pH-värde är mindre än 11. Inga naturliga processer som skulle kunna ge så höga pH-värden i svenska grundvatten på förvarsdjup är kända. Däremot kan lakvatten från vanlig cement ge pH-värden av den storleken. Därför används speciell så kallad låg-pH-cement i förvaret, särskilt i de delar som ligger nära deponeringshålen.

I detta scenario bedöms alla tänkbara orsaker till att temperaturen skulle bli för hög. Det gäller till exempel att en kapsel deponeras med för hög resteffekt, att man missförstått värmeleddningsförmågan hos berget, eller att bufferten inte skulle ha den antagna värmeleddningsförmågan. Samtliga dessa orsaker bedöms som osannolika med hänsyn till de kvalitetskrav som finns eller kommer att fastställas för bergundersökningar och deponeringssekvensen. Dessutom visar beräkningar i SR-Can att omvandlingen av bufferten blir mycket begränsad vid temperaturer så höga som 130°C . Liknande slutsatser dras för risken att bufferten skadas av för höga pH-värden.

Scenariot att bufferten omvandlas till ett material med mindre gynnsamma egenskaper betraktas därför som ett restscenario i SR-Can och konsekvenser av buffertomvandling utesluts från risksummeringen för förvaret.

6.6 Kan bufferten försvinna?

Alla buffertens funktioner i slutförvaret förutsätter naturligtvis att den finns på plats. För flera av funktionerna krävs att bufferten har en viss minsta, eller i något fall högsta, densitet. En avgörande fråga för säkerhetsanalysen är därför om bufferten på något sätt kan förloras till det omgivande berget.

Den mängd buffertlera som deponeras är sådan att buffertens densitet (täthet) efter vattenmättnad och svällning blir $2\ 000 \pm 50 \text{ kg/m}^3$, det vill säga ungefär dubbla vattnets densitet. Detta förutsätter att ingen lera förloras. Utunning eller förlust av lera kan tänkas ske på flera sätt:

- Genom att bufferten sväller uppåt och tränger undan en del av återfyllningsmaterialet i tunneln. Bufferten finns då kvar men har, åtminstone i de övre delarna, fått en minskad densitet. Beräkningar i SR-Can visar att detta aldrig kan ge förluster som hotar buffertens funktioner.
- Genom att lermaterial förs bort av vatten som flödar in till deponeringshålet innan bufferten vattenmäts och svällt och därmed täppt till alla inflödesvägar. Detta fenomen kallas kanalbildning (eng. piping) eftersom man förväntar sig att det inflödande vattnet bildar kanaler genom det osvälda lermaterialet. Fenomenet kan tänkas pågå någon månad efter deponering och kan leda till förluster av storleksordningen 100 kg i ett deponeringshål, men här finns flera osäkra faktorer. Totalt deponeras dock omkring 20 ton buffertlera i varje hål så denna förlust är måttlig och bedöms inte påverka buffertens funktioner.
- Genom att bufferten efter vattenmättnad utsätts för grundvatten med låg salthalt. Detta kan leda till att leran ”löses upp” och förs bort med grundvattnet.

Det är framför allt den sista mekanismen som kan tänkas ge förluster av en sådan omfattning att buffertens funktioner skulle kunna hotas. Grundvatten med låg salthalt kan tänkas förekomma under framför allt istider och eftersom istider förväntas under stora delar av den tid säkerhetsanalysen omfattar måste man också räkna med långa perioder då grundvattnet har låga salthalter. Förståelsen av både grundvattnets sammansättning och dess flödeshastigheter under en inlandsis är bristfällig. I SR-Can har man därför pessimistiskt antagit att grundvattnet inte har något saltinnehåll alls så fort en inlandsis täcker förvarsplatsen. Vidare antas att grundvattenflödena är ungefär som dagens, trots att det är troligt att flödena under större delen av en period av inlandsis kommer att vara lägre.

Även om grundvattnets sammansättning och flöde vore kända i detalj är det oklart vilken omfattning buffertförlusten skulle ha. Mekanismen med vilken lera förloras till sprickor i berget kring deponeringshålet är illa känd och detta är ett av de områden som har högst prioritet i SKB:s forskningsprogram. I SR-Can har man använt en grov beräkningsmodell som kan tänkas både över- och underskatta den verkliga förlusten.

Det största problemet med en omfattande buffertförlust är att kapseln utsätts för en mer omfattande korrosion. Bufferten finns ju inte där som ett skydd mot skadliga ämnen i grundvattnet. Halterna av sådana ämnen är visserligen låga men å andra sidan omfattar analysen en mycket lång tid.

Beräkningarna med den grova modellen för buffertförlust antyder att bufferten skulle kunna förloras i en sådan omfattning att dess grundläggande funktioner går förlorade i någon procent av deponeringshålen under den inledande glaciala cykeln och i tiotal procent av deponeringshålen under den miljon år som analysen totalt omfattar.

Eftersom omfattningen av buffertförlusten är osäker betraktar man i buffertförlustscenariot i SR-Can tre fall för att rama in den tänkbara omfattningen

1. Buffertförlust förekommer inte; buffertens täthet förblir vid den ursprungliga genom hela analysperioden.
2. Buffertförlust förekommer i den omfattning som beräknats med den grova modellen som nämns ovan.
3. Bufferten antas förlorad redan vid deponeringen i en sådan omfattning att dess grundläggande funktioner går förlorade.

Det är svårt att tänka sig ett mer gynnsamt fall än det första och ett mer ogynnsamt än det tredje. Därmed kan konsekvenserna av de osäkerheter som omgärdar buffertförlust sägas vara inramade. Dessa tre fall förs vidare till analysen av kapselkorrosion, se avsnitt 6.7 nedan.

6.7 Kan kapseln korrodera sönder?

Koppar är en ädel metall med stor förmåga att stå emot kemiska angrepp. Omfattande studier under lång tid av förhållandena i svenska grundvatten har lett till slutsatsen att kopparkapslarna i slutförvaret skulle kunna angripas kemiskt endast av syre och sulfid som finns naturligt i grundvattnet. Dessutom skulle mikrober i grundvattnet kunna bidra till bildningen av sulfid. Detta skulle kunna vara problematiskt om bufferten går förlorad eftersom bildningen av sulfid då kan ske nära kapselns yta.

Svenska grundvatten på förvarsdjup är syrefria. Då förvaret byggs förs syre ner i berget, men grundvattnet på förvarsdjup förväntas åter bli syrefritt kort tid efter förslutning. Både bakterier nära ytan och i själva förvaret samt mineraler i berget förbrukar effektivt syre. Den lilla mängd syre som hinner nå kapseln innan syrefria förhållanden förväntas råda i förvaret ger ingen nämnvärd korrosion, enligt beräkningar i SR-Can och även i många tidigare analyser. Under istider kan möjligens syre under korta perioder av förhöjda flöden tränga ner till förvarsdjup i större sprickor. Det är dock osannolikt att ens en liten del av detta eventuella syre når även kapslarna eftersom dessa kommer att placeras så att deponeringshålen inte korsas av större sprickor.

Alla analyser av korrosion *då bufferten är intakt* visar att inga av dessa mekanismer hotar kapseln under den miljonårsperiod analysen omfattar. Detta är väl i överensstämmelse med resultat från tidigare analyser.

Om bufferten saknas är kapseln mer utsatt för korrosiva ämnen i grundvattnet. I avsnittet ovan analyserades buffertförluster och tre olika fall målades upp. För var och ett av dessa behöver nu kapselkorrosion utredas. Det första fallet, att ingen buffert förloras ger som nämnt inga kapselskador.

För att analysera kapselkorrosion krävs en förståelse för den hydrogeologiska situationen i och kring förvaret. Det är ju med grundvattnet som skadliga ämnen transporteras till kapseln och för att beräkna omfattningen av korrosionen behövs en kvantitativ förståelse för grundvattenrörelser på platsen. Dessutom krävs kvantitativa data som beskriver koncentrationen av korrosiva ämnen i grundvattnet över hela den tid som analysen omfattar. Beskrivningarna av både grundvattenflödet och grundvattenkoncentrationerna är behäftade med osäkerheter.

För att ringa in osäkerheterna kring grundvattenflödet för dagens förhållanden i Forsmark har man i SR-Can gjort tre tolkningar av data från platsundersökningarna och alltså tagit fram tre modeller av hur grundvattnet kan tänkas röra sig i berget. För Laxemar, där data är mer preliminära, finns i SR-Can bara en sådan modell. Beskrivningarna ger också en bild av hur grundvattenflödet varierar mellan olika positioner i förvaret och därmed av hur kapslar utsätts för olika stora korrosionsangrepp beroende på var i förvaret de befinner sig.

Också för de geokemiska förhållandena finns tre olika antaganden om hur förhållandena kan tänkas vara; en ”rimlig” beskrivning där typiska värden för koncentrationer av korrosiva ämnen i grundvattnet antas, en ”försiktig” beskrivning där koncentrationen är tio gånger högre än för den ”rimliga” och en ”pessimistisk” där tio procent av kapslarna under hela miljonårs-perioden antas utsättas för koncentrationer som är de högsta som någonsin uppmätts i svenska grundvatten. Uppskattningen av halter av korrosiva ämnen gäller både sulfid $[HS^-]$, som direkt angriper kapseln, och metan $[CH_4]$, ett näringssämne för mikrober som kan omvandla sulfat till sulfid nära kapselytan. Bufferten skyddar ju kapseln också från korrasjon från mikrober, och om bufferten förlorats måste detta bidrag till korrasjon tas med.

I sammanfattning finns alltså för Forsmark

- Tre olika antaganden om koncentrationen av korrosiva ämnen i grundvattnet.
- Tre alternativa modeller för grundvattenflödet.
- Tre olika antaganden om omfattningen av buffererosion.

Sammantaget ger detta $3 \times 3 \times 3 = 27$ olika kombinationer. För samtliga dessa har kapselkorrasjonen beräknats, se figur 6-2. De flesta kombinationerna leder inte till några kapselskador; för de mest pessimistiska antagandena handlar det om några tiotal skadade kapslar efter en miljon år. Med ”skadad kapsel” avses här att korrasjonen gått så långt att den orsakat hål i kopparhöljet. Det är också värt att notera att av de tre antagandena för buffertförlust, ger förluster enligt den grova beräkningsmodellen som används i SR-Can nästan identiska resultat som antagandet att kapslarna från början deponeras utan buffert.

Hur ska då alla dessa alternativ användas då riskerna med förvaret ska värderas?

De tre modellerna för grundvattenflöde vid Forsmark är samtliga förenklingar och idealiseringar av de verkliga förhållandena på platsen. De experter som utarbetat modellerna för SR-Can kan inte peka på data tillgängliga för SR-Can som skulle antyda att någon av modellerna helt skulle kunna uteslutas, alternativt anges som mest representativ för de verkliga förhållandena. Därför används vid riskvärderingen i SR-Can den modell som ger de högsta konsekvenserna. Detta görs för att riskerna inte ska underskattas.

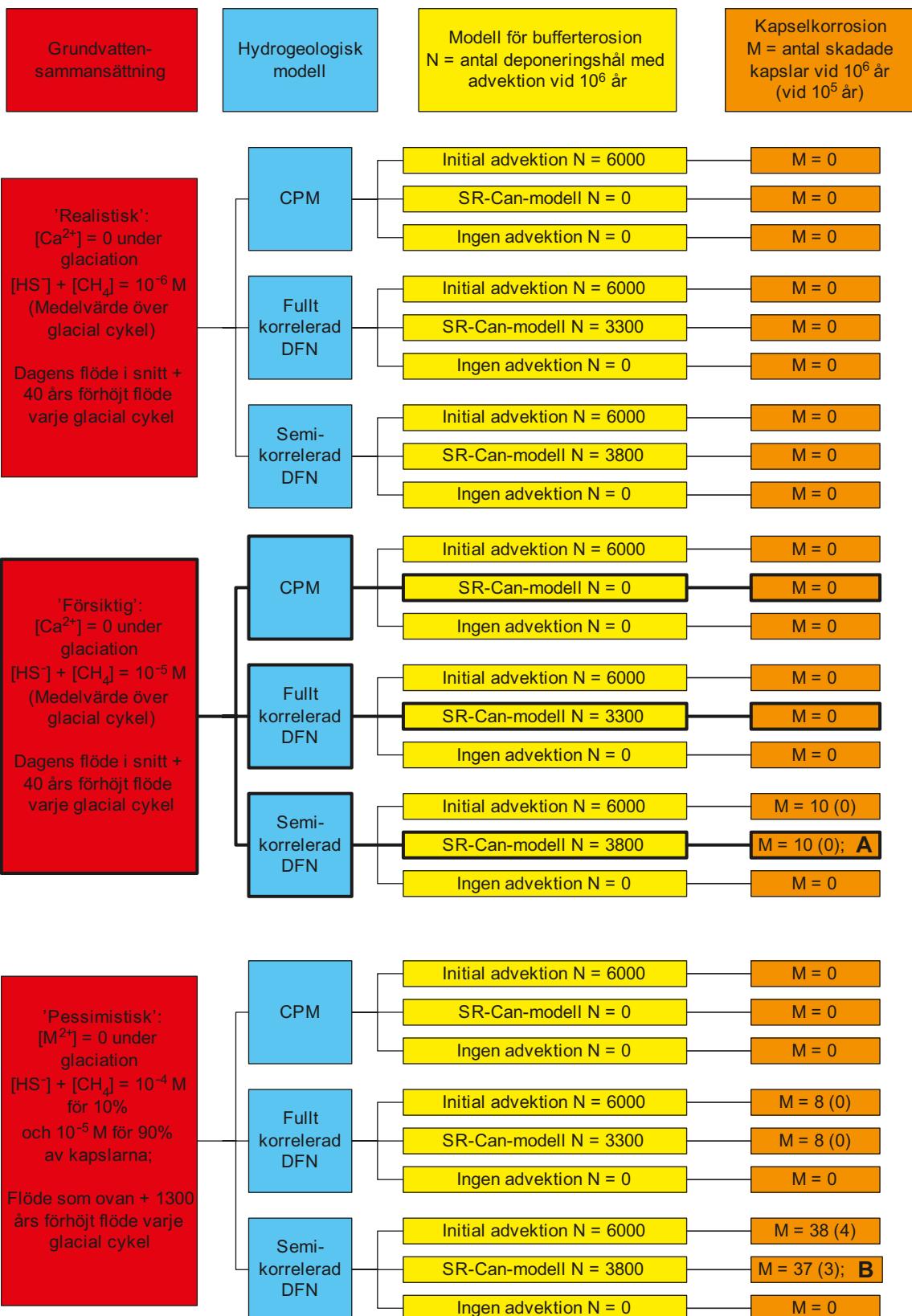
För de geokemiska förhållandena är resonemanget liknande. Det går, baserat på underlaget i SR-Can, inte att utesluta den pessimistiska varianten och därför används den vid riskvärderingen av förvaret.

Vad gäller omfattningen av buffertförluster blir konsekvenserna som nämnts nästan identiska om man jämför den grova beräkningsmodell som används i SR-Can med antagandet att bufferten saknas redan vid deponeringen. SR-Can modellen används vid riskvärderingen, men det är viktigt att notera att detta kan komma att ändras i nästa säkerhetsanalys.

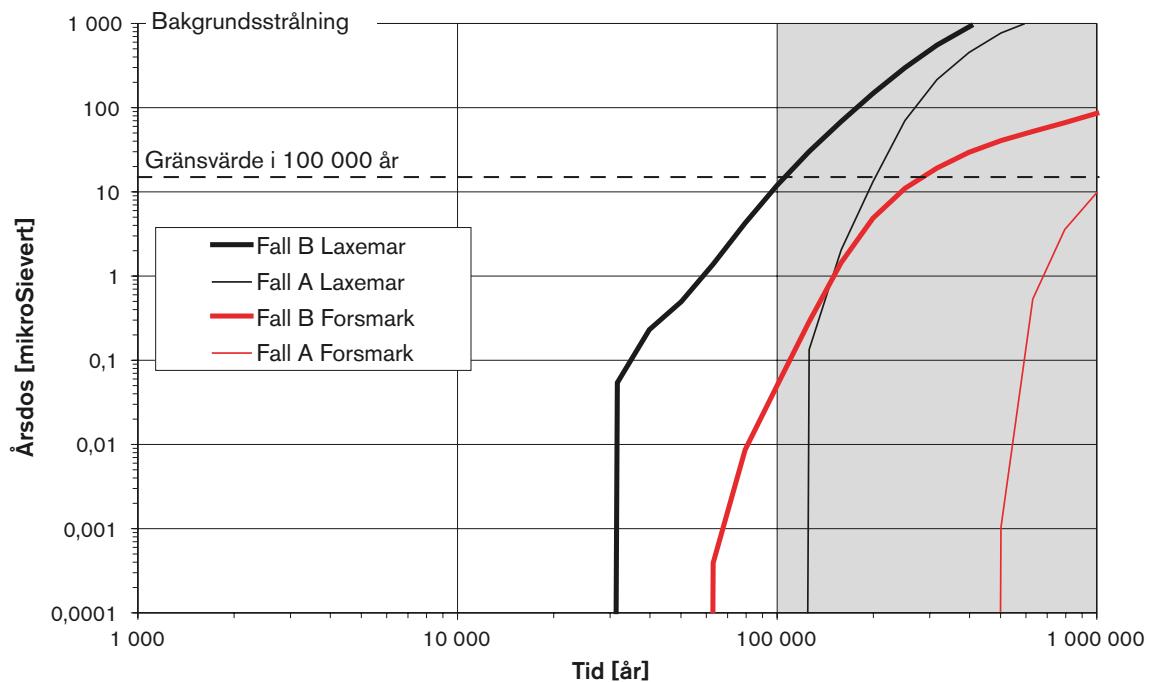
Sammantaget blir resultatet att det mest pessimistiska fallet används då säkerheten för förvaret värderas. Detta fall är markerat med ett ”B” i figur 6-2. Angreppssättet är typiskt för säkerhetsanalysen: I brist på fullständig kunskap görs pessimistiska antaganden för att inte underskatta riskerna. Fallet A svarar mot referensutvecklingen och alltså huvudscenariot.

Figur 6-3 visar beräknade doser för fallen A och B ovan. Motsvarande beräkningar för Laxemar redovisas också, men här bygger beräkningen på en hydrogeologisk modell som är alltför pessimistisk för att spegla platsens egenskaper. Det beror på att data för området där förvaret avses placeras i Laxemar inte var tillgängliga för SR-Can. I figuren visas SSI:s riskgräns omräknad till dos, det vill säga den gräns som är tillämplig i cirka 100 000 år efter förslutning. Marginalen till gränsen är vid 100 000 år stor för Forsmark men nästan obefintlig för (den icke representativa modellen för) Laxemar. På längre sikt stiger doserna allt eftersom fler kapslar skadas av korrasjon.

De beräknade doserna för detta fall utgör ett av två riskbidrag för förvaret. Det andra kommer från kapselskador till följd av jordskalv, vilket behandlas i avsnitt 6.9.



Figur 6-2. Kapselskador till följd av korrosion för olika kombinationer av antaganden om grundvattensammansättning (röda rutor), grundvattenflöde (blå rutor; beteckningarna är tekniska namn för olika modeller) och buffererosion (gula rutor). Siffrorna i de orangefärgade rutorna längst till höger anger antalet skadade kapslar efter en miljon år (efter 100 000 år inom parentes) för varje kombination.



Figur 6-3. Beräknade doser för förvar i Forsmark för fallen A och B i figur 6-2. Motsvarande resultat för Laxemar visas också, men här bygger beräkningen på en hydrogeologisk modell som är alltför pessimistisk för att spegla platsens egenskaper.

6.8 Kan kapseln skadas av trycket från grundvattnet och bentonitleran?

6.8.1 Vad tål kapseln?

I slutförvaret kommer kapseln att utsättas för isostatiskt (likformigt) tryck från den svällande bufferten och från grundvattnet. Om detta tryck blir för stort kan kapseln kollapsa. Detta så kallade kollapstrycket har studerats både experimentellt och med beräkningsmodeller.

Kollapstrycket beror av hur framför allt den lastbärande kapselinsatsen är tillverkad. För en insats som tillverkats enligt givna specifikationer har kollapstrycket beräknats till 104 MegaPascal (MPa). Om också de stålkassetter som bränslelementen ska placeras i och kopparekapseln tas med i beräkningen blir kollapstrycket i stället 130 MPa.

TVÅ kapslar har också provtryckts och de kollapsade vid 130 respektive 139 MPa, se figur 6-4. Skillnaderna tillskrivs det faktum att stålkassetten hos den förra inte var ordentligt centrerad i insatsen. SKB:s finska motsvarighet Posiva, som också avser att använda KBS-3 som förvarsmetod, har beräknat kollapstrycket hos en insats med dåligt centrerad kassett till 93 MPa.

Slutsatsen av dessa beräkningar och test är därför att kollapstrycket hos kapseln ligger nästan konstant mellan 90 och 100 MPa också för kapslar som inte är perfekt tillverkade. Resultaten har också använts till att formulera krav på noggrannheten i tillverkningen av kapselinsatserna.

6.8.2 Buffertens svälltryck

Som nämnts i avsnitt 5.4 kommer bufferten att, då den vattenmättats, utöva ett svälltryck mot sin omgivning. Svälltrycket beror främst på vilken densitet (täthet) leran har. Detta i sin tur beror framför allt på hur hårt packad leran är vid deponeringen. Målet för tillverkningen av bentoniten är att den ska vara sådan att den får en densitet av $2\ 000\ \text{kg/m}^3$ efter svällning, det vill säga ungefär två gånger vattnets densitet. Avvikelsen får vara högst $\pm 50\ \text{kg/m}^3$.



Figur 6-4. Kapseln efter provtryckning till 139 MPa.

Densiteten $2\ 000 \text{ kg/m}^3$ svarar mot ett svälltryck av cirka 7 MPa. Detta är ett avsevärt tryck; det motsvarar trycket från en 700 meter hög vattenpelare. Det kan jämföras med kapselns tyngd. En kapsel med BWR-bränsle väger cirka 24,6 ton och har en bottenyta av $0,87 \text{ m}^2$. Detta ger ett tryck mot underlaget av cirka 0,28 MPa. Trycket från kapselns egen tyngd är alltså i stort sett försumbart i jämförelse med trycket från den svällda leran.

Svältrycket varierar kraftigt med lerans densitet. En densitet av $2\ 050 \text{ kg/m}^3$, den övre tolererade gränsen vid tillverkningen av bufferten, motsvarar ett svälltryck av cirka 13 MPa. Det är alltså viktigt att säkerställa att densiteten inte blir för hög för att undvika att kapseln utsätts för ett alltför högt tryck.

I scenariot där kapselskador till följd av isostatiskt övertryck utredes ställs en rad frågor kring bentoniten:

- Kan buffertens densitet vid deponering vara högre än den tillåtna?
- Kan bufferten på något sätt i framtiden tänkas få en högre täthet än den initiala?
- Kan långsiktiga kemiska förändringar av leran leda till ett högre svälltryck?

Utredningar kring dessa frågor i SR-Can ledde till slutsatsen att buffertens svälltryck aldrig bedöms överstiga 13 MPa.

6.8.3 Grundvattentryck

Trycket hos grundvattnet på förvarsdjup motsvarar trycket från en vattenpelare lika hög som förvaret är djupt. Ett förvarsdjup av 500 meter svarar mot ett tryck av 5 MPa.

Om förvarsplatsen täcks av en inlandsis kan grundvattentrycket på förvarsdjup bli betydligt större. Om isen i botten vilar på ett vattenskikt, ett förhållande som förväntas under åtminstone delar av en glacial cykel, fortplantas trycket från isen till grundvattnet. Då tillkommer ett tryck som motsvarar en vattenpelare nästan lika hög som isen är tjock. Hur tjocka kan då inlandsisar i Sverige som mest tänkas bli?

I referensutvecklingen, där den senaste glaciala cykeln, Weichselistiden, rekonstruerades med modellstudier, beräknades den maximala istjockleken vid förvarsplatserna till 2 920 respektive 2 430 meter, vilket motsvarar tillkommande grundvattentryck av cirka 26 respektive 22 MPa. Genom att istället i modellen återskapa den största isen som förekommit under de senaste två miljoner åren, den så kallade Sale-istiden, beräknas istjocklekarna till 3 100 respektive 2 500 meter för de båda platserna, det vill säga tillkommande tryck om 28 respektive 23 MPa. De sammanlagda grundvattentrycken blir då $28+4 = 32 \text{ MPa}$ för Forsmark och $23+5 = 28 \text{ MPa}$ för Laxemar.

6.8.4 Slutsatser

För att avgöra om kapslarna kan komma att skadas på grund av trycket i förvaret ska kapselns kollapstryck (90–100 MPa) jämföras med summan av det maximala trycket från den svällande bentoniten (13 MPa) och det maximala grundvattentrycket (32 respektive 28 MPa). Slutsatsen blir att det finns en betryggande marginal till kapselkollaps för båda platserna.

6.9 Kan kapseln skadas av jordskalv?

Mekaniskt kan kapseln tänkas skadas på två sätt: Dels genom ett alltför högt tryck, vilket utredes i avsnitt 6.8 ovan, dels genom rörelser i berget.

En del deponeringshål korsas av sprickor. Även om berget är mycket stabilt över tid, kan mindre rörelser förekomma i princip i alla sprickor i berget. Det handlar här om så kallade skjuvrörelser, det vill säga rörelser där sprickans ena yta rör sig åt ett håll och den andra ytan åt motsatt håll. Om en sådan rörelse sker i en spricka som korsar en kapsel kan, om rörelsen är tillräckligt stor, kapseln skadas, se figur 6-5.

De allra flesta sprickrörelser är alldelens för små för att hota kapseln. Om ett större jordskalv skulle ske i förvarets närhet kan dock skadliga rörelser i sprickor som korsar deponeringshålen inte utan vidare uteslutas. Saken behandlas i SR-Can i ett särskilt jordskalvsscenario. Här finns en rad frågor att utreda:

- Hur stora rörelser tål kapseln?
- Kan tillräckligt stora skalv för att åstadkomma skada förekomma i närheten av slutförvaret?
- Hur har förvaret utformats för att motverka skador och finns ändå en möjlighet att sådan inträffar?
- Om en kapsel skulle skadas, vilka blir då konsekvenserna?



Figur 6-5. Schematisk illustration av en skjuvrörelse tvärs kapseln längs en stor spricka.

6.9.1 Hur stora rörelser tål kapseln?

En stor modellstudie över hur bufferten och kapseln påverkas av rörelser hos sprickor som korsar deponeringshålet har genomförts inom SR-Can. En rad faktorer av betydelse för resultatet studerades, bland annat tätheten hos bentonitbufferten, effekter av långsiktiga kemiska förändringar av bufferten samt lutningen hos sprickan. Den övergripande slutsatsen är att kapseln tål sprickrörelser som inte överstiger 10 centimeter, vilket är en avsevärd rörelse. Den fortsatta analysen handlar därför om att fastställa risken för att rörelser större än 10 centimeter förekommer.

6.9.2 Låg förekomst av stora skalv i Sverige

Som förklaras i nästa avsnitt är slutförvaret konstruerat så att det krävs ett skalv av magnitud 6 eller större för att en kapsel ska kunna skadas. Så stora jordskalv är ovanliga i Sverige. Orsaken till detta är att den svenska berggrundens befinner sig på ett stort avstånd från tektoniskt aktiva zoner, såsom den så kallade mittatlantiska ryggen.

Under en inlandsis är jordskalvsaktiviteten ännu lägre – istäcket bidrar till att stabilisera berggrundens. Då isen drar sig tillbaka kan aktiviteten däremot bli högre än normalt. De spänningar som byggs upp under isen och som inte frigjorts eftersom isen legat som en dämpande matta kan nu generera skalv. Man kan därför få en temporärt ökad jordskalvsaktivitet på en plats där en inlandsis drar sig tillbaka, så kallade post-glaciala skalv. I norra Sverige finns bevis på att sådana förekommit. Det förmodat största av dessa skalv skedde längs den cirka 150 kilometer långa Pärvieförfästningen som ligger sydost om Torneträsk (figur 6-6). Skalvet, som tros ha inträffat för cirka 9 000–10 000 år sedan, har tolkats ha uppnått magnitud 8 eller 9 på richterskalan och berget har lokalt skjuvats uppemot 10 m.

Sannolikheten för stora jordskalv på riktigt lång sikt är svår att uppskatta. I SR-Can har en rad expertbedömningar kring detta vägts samman och tolkats försiktigt. Resultatet är att man ungefärligen en gång på tio miljoner år kan förvänta sig ett skalv av magnitud 6 eller större tillräckligt nära ett förvar för att åstadkomma kapselskador.



Figur 6-6. Förfästningen i Pärvie.

6.9.3 Jordbävningssäker konstruktion

I riktigt långa tidsperspektiv kan alltså stora jordskalv i förvarets närhet inte helt uteslutas. Ett grundläggande krav är därför att förvaret byggs på ett sådant sätt att dessa skalv inte skadar kapseln. Förvaret måste byggas ”jordbävningssäkt” och det åstadkomms dels genom att ge kapseln en tillräcklig hållfasthet, dels genom att placera kapslarna på ett sådant sätt att man minimerar risken för skadlig påverkan vid ett eventuellt större skalv.

Respektavstånd till stora sprickzoner där skalv kan utlösas

Ett jordskalv är en rörelse i en större spricka eller sprickzon i berggrunden. Ju större skalv desto större sprickzon krävs för att hysa skalvet. En första princip då man vill åstadkomma ett jordbävningssäkt förvar är därför att inte placera kapslar i eller i närheten av stora sprickzoner. Regeln säger att kapslar inte får deponeras närmare än 100 meter från zoner som är tillräckligt stora för att hysa skalv av magnitud 6 eller större. På detta sätt undviker man att kapslar skadas av den primära rörelsen vid ett skalv. Stora sprickzoner är lätt att observera och det finns därför ingen anledning att tro att man skulle begå misstag i detta avseende då förvaret byggs. (I större zoner förekommer vanligen också stora grundvattenflöden, så det finns flera anledningar till att hålla sig borta från sådana då man väljer kapselpositioner.)

Det finns ytterligare ett problem med jordskalv: Den primära rörelsen, som sker i en större sprickzon, forplantas i berggrunden, något som i sin tur leder till rörelser även i mindre sprickor. Dessa så kallade sekundärrörelser är alltid mindre än de primära, men kan å andra sidan ske också i mindre sprickor. Återigen gäller sambandet att ju större spricka desto större möjlig sekundärrörelse.

Från analyserna av kapselns hållfasthet vet vi enligt ovan att den tål en sprickrörelse av minst 10 centimeter utan att skadas. Flera frågor anmäler sig:

- Hur stora sprickor krävs för att kunna hysa en sekundärrörelse om 10 centimeter?
- Hur vanliga är sådana sprickor i berggrunden vid de båda förvarsplatserna?
- Går det att hitta och därigenom undvika sådana sprickor då man väljer positioner för deponeringshål?

Analyser av sekundärrörelser i granitiskt berg visar att sprickor behöver ha en radie av minst 75 meter för att kunna röra sig 10 centimeter vid ett skalv. Detta gäller de sprickor som har sitt centrum mellan 100 och 200 meter från den stora sprickzon där skalvet antas ske. Ligger sprickans centrum längre bort än 200 meter krävs omkring 150 meters radie. I båda fallen gäller att sekundärrörelsen är störst i centrum av sprickan och avtar mot utkanterna. För en 75-meters-spricka är det bara själva centrum som rör sig 10 centimeter.

Sprickor med radier omkring 100 meter är sällsynta. Om man skulle deponera kapslar i berget vid de båda förvarsplatserna utan att ta hänsyn till sprickor som korsar deponeringshålen skulle endast ett fåtal procent av deponeringshålen korsas av sprickor som skulle kunna ge skadliga sekundärrörelser vid ett skalv. Detta kommer man fram till genom statistiska analyser av de sprickor som observeras i undersökningsborrhål och på berghällar vid platserna. Om 6 000 kapslar deponeras i Forsmark visar beräkningar att i snitt 17 kapselpositioner kommer att korsas av sådana sprickor. Motsvarande siffra för Laxemar är 31 kapslar.

Går det då att identifiera dessa sprickor och därigenom undvika potentiellt skadliga deponeringspositioner? Ännu finns ingen metod att göra detta med fullständig säkerhet, men det går att komma långt med relativt enkla medel. En spricka med en radie av 75 eller 150 meter som skär ett deponeringshål kommer på grund av sin storlek ofta att korsa också den ovanliggande tunneln från vilken deponeringshålet borrats. Om man i tunneln letar efter sprickor som korsar tunnelns yta fullständigt, och låter bli att deponera kapslar i förlängningen av sådana sprickor går det med geometriska analyser att visa att man undviker mer än 90 procent av de skadliga positionerna.

Redan med detta relativt enkla grepp blir resultatet alltså ett endast någon enstaka kapsel kommer att befina sig i en olämplig position om ett större skalv skulle inträffa i närheten av förvaret.

6.9.4 Slutsatser

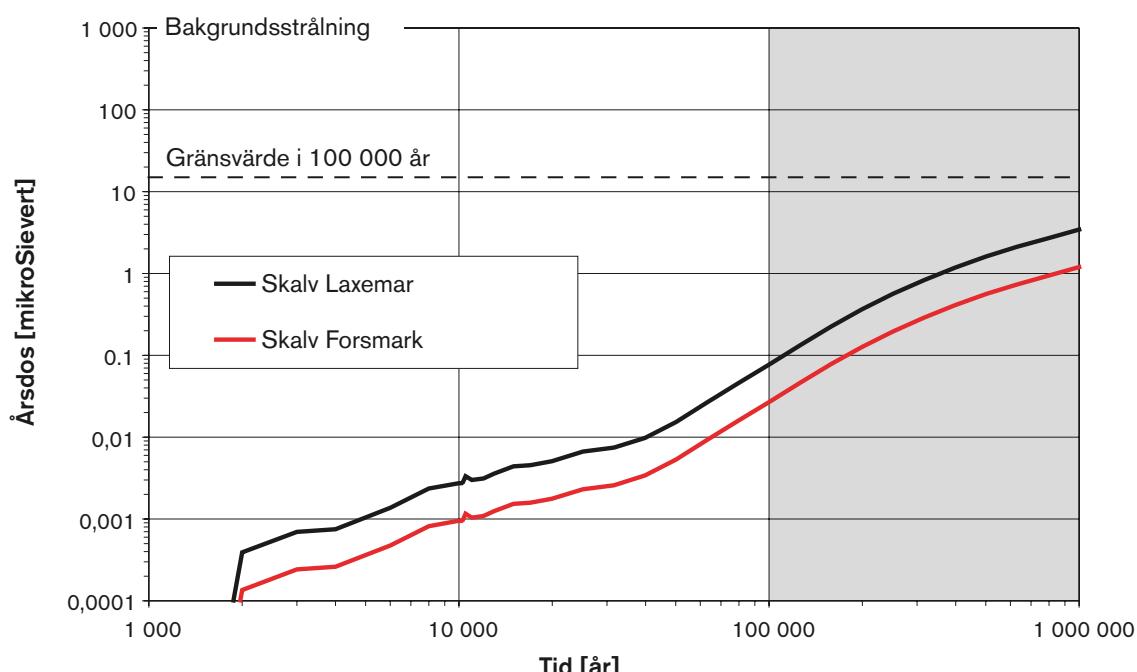
Den sammanlagda bedömningen blir i SR-Can att kapselskador till följd av jordskalv är mycket osannolika, dels för att stora skalv är osannolika, dels för att både kapselns och förvarets design är utformade för att minimera skador till följd av bergrörelser. Samtidigt visar analyserna att möjligheten inte helt kan uteslutas. Figur 6-7 visar resultatet av en beräkning som tar hänsyn dels till sannolikheten för att ett stort skalv orsakar kapselskador, dels till konsekvenserna om detta inträffar. Av figuren framgår att konsekvenserna ligger väl under myndigheternas riskgräns under de 100 000 år denna är tillämplig. Även i tidsperspektivet en miljon år är konsekvenserna under riskgränsen för båda platserna.

6.10 Intrång och andra framtida mänskliga handlingar

6.10.1 Inledning

Förvaret kommer att kunna påverkas av olika typer av framtida mänskliga handlingar. Scenarier relaterade till framtida mänskliga handlingar behöver därför behandlas i en analys av förvarets långsiktiga säkerhet. Påverkan på förvaret kan vara avsiktlig, det vill säga handlingarna utförs i vetskap om förvarets existens, eller oavsiktlig om förvarets existens i framtiden skulle vara okänd eller om effekten av en viss handling inte förutses korrekt.

Det är uppenbart att förvarets existens kan falla i glömska under de mycket långa tidsperspektiv som säkerhetsanalysen täcker. Det är dock också möjligt att dess existens förblir känd över mycket långa tider, kanske till och med bortom nästa istid. Tekniken för informationshantering och informationsbevarande utvecklas snabbt och det är omöjligt att förutse vilka möjligheter detta ger.



Figur 6-7. Beräknade risker (sammanvägning av sannolikhet och konsekvens) orsakade av större jordskalv i förvarets närhet.

Avsiktliga intrång

Avsiktliga intrång kan göras med gott eller ont uppsåt. Kommande generationer kan med goda avsikter vilja ta sig in i förvaret för att använda det deponerade bränslet till ytterligare energiproduktion, för att slutligt omhänderta bränslet på ett annat sätt eller för att kontrollera att förvaret utvecklas och fungerar som avsett. Sådana scenarier är inte alls osannolika. För att leva sig in i möjligheten kan man överväga hur vi idag skulle förhålla oss till en berganläggning på 500 meters djup som konstruerades för till exempel 1 000 år sedan (om detta hade varit tekniskt möjligt). Om anläggningen hade till syfte att skydda oss från ett farligt avfall är det inte otroligt att vi på något sätt skulle vilja direkt kontrollera att den utvecklats och fungerar som avsett. Inte heller kan man bortse från möjligheten att vi skulle ha funnit en annan metod för att ta om hand avfallet eller att vi i ljuset av nya tekniska möjligheter skulle ha kommit att betrakta det som deponerats som en resurs snarare än ett avfall. Att förvaret på detta sätt skulle komma att påverkas eller upphöra att existera efter endast en kort del av de enorma tidsperioder som säkerhetsanalysen omfattar är därför inte alls osannolikt.

Avsiktliga intrång med onda avsikter kan inte heller uteslutas. Det använda bränslet är ju farligt och kan därför användas för att skada både människa och miljö. Delar av bränslet kan, efter omfattande bearbetning, användas till vapenproduktion. Att tränga ner till förvaret är dock en mycket omfattande och långvarig operation som rimligen inte kan genomföras utan samhällets sanktion, åtminstone inte så som samhället är organiserat idag. Det skulle också krävas avsevärda resurser för en sådan operation. Om ett samhälle eller en grupp individer skulle ha den här typen av onda avsikter kommer det troligen att finnas enklare sätt att nå samma mål.

Det är omöjligt att bedöma hur troliga olika typer av framtida avsiktliga intrång i förvaret är. Inte heller kan vi på något rimligt sätt bedöma konsekvenserna av avsiktliga intrång; dessa skulle ju komma att styras helt av intentionen bakom intrånget. Konsekvensanalysen skulle bli av ett helt annat slag och betydligt mer spekulativ än de analyser av naturliga fenomen och förflopp (grundvattenrörelser, korrosion etc) som säkerhetsanalysen sysslar med. Intrång med goda avsikter genomförs ju rimligen dessutom efter att ett framtida samhälle noga övervägt konsekvenserna och därvid funnit att nytta med ett intrång motiverar kostnaderna och riskerna.

I sammanfattning ligger det i KBS-3-metodens natur att man lämnar ett förvar med ett koncentrerat och isolerat farligt avfall till framtida generationer. Förvaret är konstruerat så att det inte ska kräva ingrepp i framtiden. Så länge dess existens är känd kan vi dock räkna med att det kommer att finnas en diskussion om huruvida förvaret ska lämnas orört, åtminstone då en avsevärd tid förlutit efter vår egen beslutsprocess i frågan. Det är rimligt att dagens samhälle överväger detta faktum i beslutsprocessen kring förvaret.

Oavsiktliga intrång

För att minska sannolikheten för oavsiktliga intrång vidtas följande åtgärder vid lokaliseringen och utformandet av förvaret:

- Förvaret lokaliseras till en plats som inte innehåller naturresurser som bedöms kunna vara av intresse för framtida generationer.
- Förvarsdjupet väljs så att förvaret rimligen inte stör framtida vattenförsörjning och tänkbara underjordsanläggningar.
- Förvaret försluts.
- Åtgärder vidtas för att underlätta institutionell kontroll och för att bevara information om förvaret så länge som möjligt.

Oavsiktliga intrång kan dock inte uteslutas och analys av sådana utgör en del av säkerhetsanalysen. I scenerievalet i avsnitt 6.2 och tabell 6-1, urskiljdes två huvudkategorier av oavsiktliga framtida mänskliga handlingar (Future Human Actions, FHA): scenerier relaterade till ett förslutet förvar och sådana relaterade till ett öppet eller ofullständigt förslutet förvar.

Endast den förra kategorin har, på grund av tidsbrist, analyserats i SR-Can. I det följande sammanfattas hanteringen av dessa scenarier i SR-Can.

6.10.2 Principer och metod för hantering av framtida mänskliga handlingar

Människan är beroende av, och påverkar, miljön som hon lever i. Efter förslutning av slutförvaret ska framtida generationer kunna utnyttja platsen efter sina behov, utan att riskera sin hälsa. Då det gäller slutförvar av typen KBS-3 finns det emellertid alltid exempel på handlingar som, om de utförs oförsiktigt eller utan kunskap om slutförvaret, skulle kunna leda till expонering för radioaktivt material. Exempel på sådana handlingar är borring av djupa hål och brytning av tunnlar, schakt eller bergrum på stort djup inom förvarsområdet. Globala mänskliga handlingar, som emission av växthusgaser och förorening, kan också påverka slutförvaret. Det råder internationell samsyn om att framtida mänskliga handlingar ska betraktas i säkerhetsanalyser av geologiska slutförvar. Detta uttrycks också explicit i SKI:s och SSI:s föreskrifter om slutförvaring.

Mänskliga handlingar som måste beaktas är sådana som skulle kunna påverka förvarets säkerhetsfunktioner. Dessa handlingar kan delas in i olika kategorier till exempel ”nyligen genomförda och pågående” eller ”framtida”; ”globala” eller ”lokala” och ”oavsiktliga” eller ”avsiktliga”. Nyligen genomförda och pågående, lokala, avsiktliga handlingar beaktas i beskrivningen av lokala ekosystem. Missöden som uppträder under bygg- och driftskedena kan betraktas som lokala, oavsiktlig handlingar. Missöden beaktas i den allmänna hanteringen av osäkerheter i de olika scenarierna. Globala, nyligen genomförda och pågående emissioner av växthusgaser kan påverka klimatet och beaktas i växthusvarianten av huvudscenariot, avsnitt 5.7 men har ingen direkt inverkan på slutförvaret. Därmed kvarstår globala föroreningar, annan än emission av växthusgaser, samt lokala framtida handlingar för vidare analys.

Utgående från vad som sagts ovan begränsas de framtida mänskliga handlingar som beaktas i denna del av säkerhetsanalysen till globala föroreningar samt ingrepp som:

- utförs efter förslutning av förvaret,
- sker vid eller nära förvaret,
- är oavsiktliga det vill säga utförs när platsen för förvaret är okänd, dess syfte glömt eller konsekvenserna av ingreppet är okända,
- försämrar säkerhetsfunktionerna för förvarets barriärer.

Ett problem i samband med diskussion om framtida mänskliga handlingar är att framtiden för mänskliga och samhälle inte kan förutsägas. Vid tidsspann på tiotals år eller mera är det bästa vi kan åstadkomma att identifiera några viktiga faktorer och kombinera dessa för att undersöka möjliga resultat. Vid tidsspann på hundratals år eller mera är emellertid framtiden för mänskliga och samhälle oförutsägbar. Det är till exempel omöjligt att fastställa vilka vetenskapliga upptäckter som kommer att göras under de närmaste 1 000 åren. Ett vanligt angreppssätt på detta problem och ett sätt att undvika spekulationer om framtiden är att anta att framtida samhälle och teknik i princip är desamma som idag. Även om det inte är sannolikt ger det ett praktiskt genomförbart angreppssätt för att illustrera tänkbara faror relaterade till framtida mänskliga handlingar vid platsen för slutförvaret. Denna metod tillämpas också i SR-Can.

I de allmänna råden till sina föreskrifter rekommenderar SSI att direkt intrång genom borring, liksom exempel på handlingar som indirekt kan påverka säkerhetsfunktionerna, tas med i säkerhetsanalysen. SSI rekommenderar även att scenarier för framtida mänskliga handlingar baseras på dagens vanor och tekniska metoder. Då det gäller konsekvenserna anser SSI att endast doser som beror på nedsatt barriärfunktion hos förvaret behöver beaktas. Konsekvenserna för enskilda individer som tränger in behöver inte beaktas.

I enlighet med SSI:s allmänna råd utvärderas framtida mänskliga handlingar och deras inverkan på slutförvaret separat. De tas inte in i huvudscenariot eller i risksummeringen.

Metod

Mänskliga handlingar kan påverka slutförvaret på olika sätt. Inverkan av handlingar på förvaret liksom handlingarnas konsekvenser är resultatet av en kombination av tekniska och samhälleliga faktorer. Exempel på sådana faktorer är nivån av teknik och kunskap, förekomst av institutionell kontroll, infrastruktur och bosättningsmönster samt system för livsmedelsförsörjning. För att ge en så omfattande bild som möjligt av olika mänskliga handlingar som kan påverka slutförvaret, liksom deras bakgrund och syfte, har följande systematik tillämpats. Systematiken beskrivs närmare i **FHA-rapporten**.

A. Teknisk analys:

Identifiera mänskliga handlingar som kan påverka säkerhetsfunktionerna hos förvaret och beskriva och motivera handlingarna i tekniska termer.

B. Analys av samhälleliga faktorer:

Identifiera ramscenarier (ramförhållanden) som beskriver rimliga samhälleliga sammanhang för framtida mänskliga handlingar som kan påverka den radiologiska säkerheten hos ett slutförvar.

C. Val av representativa fall:

Resultaten av tekniska och samhälleliga analyser kombineras och ett eller flera illustrativa fall av framtida mänskliga handlingar väljs.

D. Scenariobeskrivning och konsekvensanalys av de valda fallen.

Stegen A till C redovisas i detalj i **FHA-rapporten** och baseras i huvudsak på arbete som utförts i samband med säkerhetsanalysen SR 97. Resultat från utvecklingen av SKB:s FEP-databas, avsnitt 4.2, och en granskning av litteratur som publicerats efter SR 97 har också beaktats. Det sista steget analyseras och redovisas i huvudrapporten SR-Can.

Tabell 6-2 visar de handlingar som kan påverka slutförvarets säkerhet och som identifierades i den tekniska analysen. I avsnitt 6.10.3 sammanfattas valet av representativa fall och i avsnitt 6.10.4 sammanfattas resultaten av konsekvensanalyserna av de valda fallen.

6.10.3 Val av representativa fall

Det är sannolikt att förvarsplatsen kommer att användas av människor i framtiden. Mänskliga handlingar som påverkar den radiologiska säkerheten och som utförs utan kunskap om slutförvaret och/eller dess syfte kan inte uteslutas.

Handlingar som utförs på eller nära markytan, ner till ett djup av några tiotals meter, bedöms inte leda till någon direkt påverkan på de tekniska barriärerna och isoleringen av bränslet. Detta gäller handlingarna T4, H2, H3, H4, H5, H6, H7, H8, M3, M4, C2, C3, C4 och C5 i tabell 6-2 (även om några av dessa skulle kunna innefatta borrhning av relativt djupa brunnar). Handlingar nära ytan som tillhör kategorierna M och H bedöms ha mindre inverkan på förvaret än klimatförändringar och relaterade naturliga förändringar till exempel strandlinjeförskjutning. Av handlingarna som innehåller kemisk påverkan (C2–C5) har försurning av luft och mark (C3) studerats närmare. Studierna visar att miljön på förvarsdjup inte påverkas i realistiska fall av försurning genom atmosfäriskt svavel och koldioxid. Jordlager och berggrund bedöms fungera effektivt som både filter och buffert, även mot andra kemiska föreningar.

Bombning eller sprängning på ytan ovanför förvaret (M5) kan inte påverka isoleringen av avfallet, utom i fall av kraftiga kärnvapen. En sådan händelse skulle innebära att ett kärnvapenkrig pågår, och konsekvenserna av kriget och själva sprängningen skulle vara mycket större än konsekvenserna av eventuella utsläpp från förvaret. Underjordiska kärnvapenprov (M6) nära slutförvaret kan emellertid bryta isoleringen på liknande sätt som en jordbävning. Provet skulle i så fall behöva utföras nära de deponerade kapslarna. Kärnvapenprov kan kombineras med identifierade samhälleliga sammanhang för att bilda ett scenario som inte kan uteslutas.

Tabell 6-2. Mänskliga handlingar som kan påverka slutförvarets säkerhet.

Aspekt	Åtgärd
Termisk inverkan	T1: Bygga värmeackumulator* T2: Bygga värmepumpsystem* T3: Utvinna geotermisk energi (geotermi)* T4: Bygga anläggning som genererar värme/kyla till ytan ovanför slutförvaret
Hydrologisk inverkan	H1: Bygga brunn* H2: Bygga damm H3: Förflytta lopp eller storlek av ytvattendrag (flod, sjö, hav) och deras förbindelser med andra vattendrag H4: Bygga vattenkraftanläggning* H5: Bygga dräneringssystem H6: Bygga infiltrationssystem H7: Bygga bevattningssystem* H8: Förflytta förhållanden för grundvattenbildning genom förändrad markanvändning
Mekanisk inverkan	M1: Borring i berg* M2: Bygga bergrum, tunnlar, schakt etc.* M3: Dagbrottsgruvor eller stenbrott* M4: Bygga tipp eller deponi M5: Bomba eller spränga på ytan över förvaret M6: Bomb eller sprängning under markytan*
Kemisk inverkan	C1: Lagring/slutförvaring av farligt avfall i berget C2: Bygga sanitär deponi (soptipp) C3: Försurning av luft, mark och berggrund C4: Sterilisering av mark C5: Orsaka olyckor som medföljer kemisk kontaminering

* Innefattar eller kan innefatta borring och/eller byggande av bergrum.

Emellertid kräver kärnvapenprov kunskap om nuklear fission och tillhörande risker, och de utförs under jorden för att undvika miljöpåverkan. Eftersom mätningar utförs i samband med proven är det sannolikt att om ett detekterbart utsläpp från förvaret skulle uppstå så skulle det kunna särskiljas från utsläppen från provet och hanteras av det samhälle som utför det underjordiska kärnvapenprovet.

Några av handlingarna i tabell 6-2 kan – förutom att påverka radionuklidtransporten – indirekt påverka isoleringen av avfallet i den mån de påverkar geosfärens förmåga att tillhandahålla gynnsamma hydrologiska eller kemiska förhållanden. Sådana handlingar måste genomföras direkt ovanför eller mycket nära slutförvaret, och innefatta borring och/eller bergbrytning. Dessa kategorier innefattar handlingar som har att göra med värmeutvinning (T1, T2, T3), brunnsborring (H1) och slutförvaring av farligt avfall i berg (C1). Vattenkraftanläggningar (H5) och dagbrottsgruvor och stenbrott (M3) kan också innefatta borring eller bergbrytning på stora djup. Innan en berganläggning byggs utförs provborrningar för att undersöka berggrunden. Gemensamt för alla dessa fall är alltså – om dagens teknik tillämpas – att de innefattar borring i berget.

Större berganläggningar intill slutförvaret bedöms som uteslutna i det kortare tidsperspektivet, det vill säga inom några hundratals år, av flera orsaker. Till exempel är slutförvaret i sig självt en stor berganläggning – den enda i sitt slag i Sverige – och det förefaller mycket osannolikt att den skulle glömmas inom så kort tid. Institutionell kontroll kan förväntas fortgå på denna tidsskala. De listade handlingarna som innefattar större bergarbeten är mindre sannolika vid

förvarsplatserna, utgående från aktuella tekniska och ekonomiska förhållanden. I ett något längre tidsperspektiv, det vill säga några eller flera hundra år eller mera, är det svårt att förutsäga hur kunskap, teknik och samhälle kommer att utvecklas, och därmed hur, var och varför berganläggningar kommer att byggas. Utgående från dagens teknik kan berganläggningar på djup ner till omkring 50 meter mycket väl bli aktuella, och förekommer redan idag vid båda kandidatplatserna (SFR-anläggningen vid Forsmark och Clab-anläggningen vid Oskarshamn). I en avlägsen framtid skulle det kunna det bli aktuellt att exploatera malmresurserna sydväst om det undersökta området vid Forsmark.

Av handlingarna i tabell 6-2 bedöms endast ”Borrning i berg” kunna leda till en direkt skada på en kopparkapsel så att isoleringen bryts, genomförs oavsiktligt och vara tekniskt möjlig och fullt rimlig sett i ljuset av resultaten från den samhälletliga analysen. Även om det är möjligt att bryta bergrum, tunnlar eller schakt, eller att öppna en dagbrottsgruva, som medför direkta skador på kopparkapseln, anses det inte vara tekniskt troligt att så skulle ske utan att man i förväg har undersökt berget och upptäckt förvaret, det vill säga utan att ha kunskap om förvaret. Emellertid kan byggnad av en berganläggning på litet djup eller öppning av en gruva i närheten av Forsmark bli aktuellt i framtiden. Fallen ”Kapselskada genom borrring”, ”Berganläggning i närheten av förvaret” och ”Gruva i närheten av Forsmark” har därför valts för ytterligare beskrivning och analys.

6.10.4 Analys av de valda fallen

Kapselskada genom borrring

Analyserna i SR-Can visar att om en kapsel penetreras genom borrring, om säkerhetsfunktionerna hos buffert och återfyllning går förlorade och om borrhålet därefter används som brunn för dricksvattnet och bevattning kommer doserna till de människor som använder vattnet att kunna överskrida de doser som svara mot SSI:s riskgräns, men inte den dos som orsakas av bakgrundsstrålningen i Sverige.

Berganläggning i närheten av förvaret

Detta fall gäller en berganläggning på cirka 50 meters djup i närheten av förvaret. Analyserna i SR-Can visar att en sådan anläggning inte skulle påverka förvarets säkerhet.

Gruva i närheten av Forsmark

Analyserna av detta fall i SR-Can visar att en eventuell framtida exploatering av malmresurserna i närheten av förvärsplatsen i Forsmark inte skulle påverka säkerhetsfunktionerna för förvaret. Om framtida generationer beslutar att utnyttja den identifierade mineraliseringen kan de göra detta utan att exponera sig för radioaktivt material från förvaret.

6.11 Sammanfattning samt kombinationer av scenarier

Sammanfattning av scenarioanalyser

I sammanfattning har scenarieanalyserna givit följande resultat:

- Huvudscenariot: Kapselskador kan uppstå till följd av buffertförlust och åtföljande förhöjd korrosionshastighet. Detta ger i princip ett riskbidrag, men den vidare hanteringen av osäkerheterna kring detta fenomen i kapselkorrosionsscenariot ger ett högre riskbidrag som ersätter det för huvudscenariot.

- Omvandling av bufferten: Analyserna av tänkbara orsaker till skadligt förhöjd temperatur eller förhöjt pH i bufferten ledde till slutsatsen att detta betraktas som ett restscenario.
Situationen med en omvandlad buffert fördes därför inte vidare till analyserna av kapsel-scenarier.
- Frysning av bufferten: Detta bedömdes som uteslutet i huvudscenariot, också för en eroderad buffert. De ytterligare analyserna i buffertfrysningsscenariot ledde till slutsatsen att detta betraktas som ett restscenario för en intakt buffert. För en delvis eroderad buffert, kan vatten möjigen fryska i de hålrum som erosionen orsakar men de mekaniska konsekvenserna för kapseln bedömdes inte leda till några skador. *Situationen med en frusen buffert fördes därför inte vidare till analyserna av kapsel-scenarier.*
- Förlust av buffert: Detta kan förekomma i huvudscenariot. De ytterligare analyserna som sammanfattas i avsnitt 6.6 visar att den möjliga omfattningen av detta fenomen kan variera inom vida gränser. *Tre fall med olika omfattning av buffertförlust fördes därför vidare till analysen av kapsel-scenarierna.*
- Kapselskador till följd av korrosion: Detta ingår i huvudscenariot för både Forsmark och Laxemar, för fallet att bufferten är eroderad. De ytterligare analyserna i korrosionsscenariot visar också att korrosionsskador bara uppkommer om bufferten är eroderad. *Analysen rymmer många osäkerheter. Av en rad tänkbara utfall valdes det mest pessimistiska för riskbedömningen i SR-Can på grund av bristerna i kunskapsunderlaget.*
- Kapselskador till följd av isostatisk last: Detta bedömdes som uteslutet i huvudscenariot. De ytterligare analyserna i scenariot ledde till slutsatsen att detta betraktas som ett restscenario. *Scenariot ingår därför inte i risksummeringen för förvaret.*
- Kapselskador till följd av jordskalv: Detta uteslöts definitionsmässigt från huvudscenariot på grund låg sannolikhet. I jordskalvsscenariot vägdes sannolikheter och konsekvenser samman till en riskberäkning för scenariot. *Resultatet av riskberäkningen ingår i risksummeringen för förvaret.*
- FHA-scenarier: Ett antal scenarier relaterade till framtida mänskliga handlingar har också analyserats. *Dessa ingår i enlighet med SSI:s föreskrifter inte i risksummeringen för förvaret.*

Kombinationer av scenarier

För att få en fullständig bild av tänkbara händelseförlopp och risker måste också kombinationer av de analyserade scenarierna övervägas.

Det är dock viktigt att notera att flera sådana kombinationer redan har behandlats eftersom de tre buffertscenarierna analyserades först och resultat av de buffertscenarier som inte bedömdes kunna uteslutas fördes vidare till analysen av de tre kapsel-scenarierna.

Tabell 6-3 ger en kortfattad redovisning av hur dessa och andra kombinationer av par av scenarier har hanterats. Av tabellen framgår att inga av dessa kombinationer ger bidrag till riskbedömningen som går utöver de som redan identifierats.

Risksummering

Scenarioanalyserna i SR-Can har således visat att det finns två förlopp som skulle kunna leda till att kapslarnas isolering bryts. Det ena är jordskalv och det andra förlust av bufferten med påföljande ökad korrosion av koppar-kapslarna. Konsekvenserna av båda dessa förlopp har redovisats i respektive scenario ovan. Den totala risken/konsekvensen blir helt enkelt summan av de två bidragen. Den summerade riskkurvan redovisas och diskuteras för båda platserna i avsnitt 7.4 i slutsatskapitlet.

Tabell 6-3. Analys av parvisa kombinationer av de sex buffert- och kapselscenarierna.
Gröna celler: Orealistisk kombination eftersom minst en komponent är ett restscenario.
Gula celler: Kombinationer som beaktats och uteslutits. **Röd cell:** Kombination som förts vidare till risksummering.

	Advektion i buffernen	Buffertfrysning	Buffertomvandling	Kapselbrott; korrosion	Kapselbrott; isostatisk kollaps
Advektion i buffernen					
Buffert-frysning	Kombinerade men ger inga kapsel-skador, se avsnitt 6.3.				
Buffert-omvandling	Omvandling är ett restscenario, därfor inte kombinerade.	Båda är restscenarier, därfor inte kombinerade.			
Kapselbrott; korrosion	Kombinerade i avsnitt 6.7, ingår i risksummeringen.	Frysning är ett restscenario, därfor ej kombinerade.	Omvandling är ett restscenario, därfor ej kombinerade.		
Kapselbrott; isostatisk kollaps	Isostatisk kollaps restscenario. Bufferterosion/advektion gynnsamt för att undvika isostatisk kollaps genom minskat svälltryck. Ej kombinerade.	Frysning är ett restscenario, därfor ej kombinerade. (Se även avsnitt 6.3.)	Båda är restscenarier och omvandling är gynnsamt för isostatiska tryck, därfor ej kombinerade.	Isostatisk kollaps restscenario. (Kopparkorrosion påverkar inte isostatisk kollaps eftersom endast insatsen är lastbärande.)	
Kapselbrott; skjuvrörelser	Ej kombinerade eftersom a) bufferterosion/advektion är gynnsamt för att undvika skador till följd av skjuvrörelser (minskad buffertstyrhet). b) Kapselkador till följd av skjuvrörelser som sedan följs av erosion/advektion ger inga ökade konsekvenser.	Frysning är ett restscenario, därfor ej kombinerade.	Omvandling är ett restscenario, därfor ej kombinerade. (Ändrade buffertmaterial-egenskaper i kombination med skjuvrörelser har ändå studerats.)	Kopparkorrosion påverkar inte kapselkollaps till följd av skjuvrörelser eftersom endast insatsen är lastbärande.	Bedömt som orealistisk kombination i avsnitt 12.9.2 i huvudrapporten SR-Can.

6.12 Vad händer om vi tar bort barriärerna?

6.12.1 Inledning

Enligt SKIFS 2002:1 bör säkerhetsanalysen "...omfatta händelseförlopp och förhållanden som väljs och studeras oberoende av sannolikheter bland annat för att belysa betydelsen av enskilda barriärer och barriärfunktioner."

SSI:s allmänna råd anger följande: "För slutförvar som i första hand baseras på inneslutning av det använda kärnbränslet eller kärnavfallet bör en analys av ett tänkt bortfall, under de första tusen åren efter förslutning, av någon eller några barriärfunktioner av central betydelse för skyddsformågan redovisas separat utanför riskanalysen. Syftet med en sådan analys bör vara att tydliggöra hur de olika barriärerna bidrar till slutförvarets skyddsformåga."

Dessa krav är en lämplig utgångspunkt för formulering av fall som kan illustrera barriärfunktioner. Generellt bedömdes inga bortfall av nyckelfunktioner inträffa under de första tusen åren i referensutvecklingen. Dessa fall är alltså rent illustrativa med avseende på förvarets säkerhet. Eftersom det inte finns någon speciell tidpunkt under de första tusen åren där det är mera sannolikt att ett funktionsbortfall uppstår baseras fallen på att bortfallet finns redan initialt, det vill säga barriärdefekter som finns vid deponering.

Följande fall av barriärbrister har analyserats:

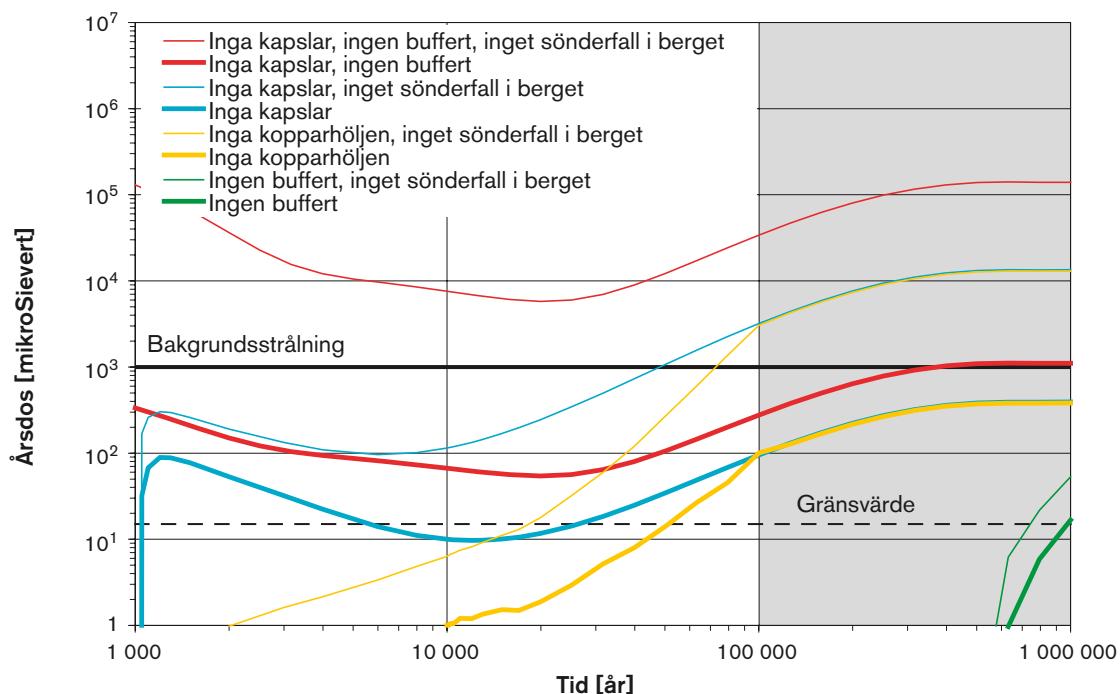
- En stor öppning i kopparhöljet vid förslutning av förvaret *för alla kapslar*.
- En avsaknad av buffertmaterial, tillräcklig för att omintetgöra buffertens funktion att förhindra flöde av grundvatten genom deponeringshålet vid förslutning av förvaret och *för alla deponeringshål*.
- En kombination av ovan nämnda två fall, det vill säga en stor öppning i *alla kapslar* och avsaknad av buffert *i alla deponeringshål* vid förslutning av förvaret.

Vart och ett av de tre fallen studeras både med och utan hänsyn tagen till berggrundens förmåga att fördröja radionuklider vilket ger totalt sex utsläppssituationer.

Den mest pessimistiska av de tre hydrogeologiska modellerna för Forsmark har använts för dessa stiliserade beräkningar. Detta val är adekvat då resultaten används för att sätta gränser för de möjliga konsekvenserna av dessa ansatta haverier.

6.12.2 Resultat och diskussion

Resultaten av fallen som definieras ovan ges i figur 6-8.



Figur 6-8. Resultat av stiliserade fall för att illustrera barriärfunktioner. "Inga kapslar" betyder att både kopparhöljet och gjutjärnsinsatsen var defekta från början.

Inga kopparhöljen

I detta fall har den primära säkerhetsfunktionen gått förlorad vilket med tiden ger avsevärda konsekvenser. Gjutjärnsinsatserna antas dock finnas kvar initialt och fördröjer utsläppen. Doserna domineras av radium-226, en naturligt förekommande radionuklid. Det är dock värt att notera att de beräknade konsekvenserna för detta stiliserade fall understiger dem som orsakas av bakgrundsstrålningen. Om berggrundens fördröjande förmåga också skulle försummas ökar konsekvenserna med ungefär en storleksordning.

Inga kopparhöljen och inga gjutjärnsinsatser (inga kapslar)

Detta fall liknar fallet ovan, men med en tidigare start av radionuklidutsläpp. Efter 100 000 år är de två fallen identiska eftersom alla insatser i det första fallet då antas ha genomgående skador.

Ingen buffert

I detta fall inträffar kapselbrott endast i ett fåtal (tio) deponeringshål, nämligen de där det förekommer ett grundvattenflöde som transporterar fram en sådan mängd kapselkorroderande ämnen att det uppstår kapselskador på grund av korrasjon. Doserna vid slutet av analysperioden är omkring två storleksordningar lägre än bakgrundsstrålningen och ökar med mindre än en faktor tio om berggrundens fördröjande förmåga försummas.

Inga kapslar och ingen buffert

I detta fall antas att grundvatten kan strömma obehindrat genom alla deponeringshål och att alla kapslar (både kopparhölje och gjutjärnsinsats) är defekta. Fölkartligen har två av nyckelbarriärena gått förlorade i samtliga deponeringshål. Endast den långsamma upplösningen av bränslet och berggrundens fördröjande förmåga begränsar konsekvenserna. Konsekvenserna i detta fall är jämförbara med dem från bakgrundsstrålningen. Resultaten visar dessutom att berggrundens fördräjande förmåga spelar en viktigare roll i detta fall. Att försumma berggrundens fördräjande förmåga ökar doserna med omkring två storleksordningar.

Detta är ett signifikant resultat. Trots att alla kapslar och all buffert antas förlorade redan från början ligger konsekvenserna inte över dem från bakgrundsstrålningen. Vidare ökar de beräknade doserna endast obetydligt med tiden bortom en miljon år, så länge berggrunden är stabil och biosfären liknar den under en period med tempererat klimat. Det beror på att alla kapslar redan har havererat och den enda faktorn som leder till ökade utsläpp är den fortsatta bränsleupplösningen.

Slutsatser

Dessa analyser visar tydligt flerbarriärfunktionen hos KBS-3-systemet. I till exempel det orealistiska fallet av totalt initialt haveri av kapsel och buffert, visar figur 6-8 tydligt berggrundens betydelse. På liknande sätt, om vi orealistiskt försummar bufferten, men behåller kapsel och berggrund, framgår att bufferten har liten inverkan, även om bufferten i sig är tillräcklig för att hålla doserna under dem från bakgrundsstrålningen i nästan 100 000 år.

Sammanfattningsvis har det visats att fullständigt orealistiska illustrerande ansatser om tidigt haveri hos alla kapslar och allt buffertmaterial medför långsiktiga konsekvenser som är jämförbara med dem från naturlig bakgrundsstrålning.

Det bör även noteras att de värden som använts för att omvandla utsläpp till doser är så konstruerade att de återspeglar värsta tänkbara exponeringssituation under en period av tempererat klimat. Under en överväldigande stor del av analysperioden på en miljon år förväntas dessa dosomvandlingsfaktorer vara lägre.

7 Huvudsakliga resultat och slutsatser

Detta kapitel bygger på materialet i kapitel 13 i huvudrapporten SR-Can.

De viktigaste resultaten från SR-Can-projektet sammanfattas i avsnitten 7.1 till 7.3 nedan. En mera detaljerad diskussion om uppfyllelse av SSI:s riskkriterium ges i avsnitt 7.4, medan ytterligare resultat och slutsatser sammanfattas i avsnitt 7.5. I avsnitt 7.6 redovisas kort viktiga återstående frågor och i avsnitt 7.7 diskuteras slutligen tilltron till resultaten i säkerhetsanalysen SR-Can.

7.1 Uppfyllelse av riskkriteriet

Inga kapselbrott bedöms inträffa under den första perioden av tempererat klimat, som förväntas sträcka sig flera tusen år framåt

Inga kapselbrott förväntas vid någon av platserna under den första perioden av tempererat klimat efter deponering, som bedöms fortgå i flera tusen år. Dessutom har hittills utförda utvärderingar av defekter i kapselförslutningen lett till slutsatsen att alla kapslar kommer att vara tätta vid deponeringen.

Ett förvar vid Forsmark bedöms uppfylla riskkriteriet

Den preliminära analysen i SR-Can anger att ett KBS-3-förvar vid Forsmark kommer att uppfylla SSI:s riskkriterium.

Osäkerheterna är dock betydande i den hydrogeologiska tolkningen och förståelsen för Forsmark. När dessa osäkerheter förs vidare till andra delar av analysen leder det till ett brett spann av möjligheter kring till exempel buffererosion och vattenflödets egenskaper. En minskning av dessa osäkerheter skulle tillåta säkrare slutsatser i framtida analyser. Även den mest pessimistiska tolkningen av Forsmark bedöms dock uppfylla SSI:s riskkriterium.

Ett förvar vid Laxemar bedöms preliminärt uppfylla riskkriteriet – men mer representativa data krävs

Den platsbeskrivande modellen version 1.2 för Laxemar är inte tillräckligt representativ för den tilltänkta förvarsvolymen för att möjliggöra definitiva slutsatser om kravuppfyllelse. Framför allt baseras den hydrogeologiska tolkningen av platsen på data som delvis samlats in utanför kandidatvolymen för förvaret. Dessutom visar nyligen insamlade data på mera gynnsamma hydrogeologiska egenskaper än dem som platsmodellen i SR-Can bygger på.

Man kan dock konstatera att med de data som används för Laxemar bedöms platsen uppfylla riskkriteriet. Denna slutsats skulle troligen stärkas med användning av senare insamlade data.

7.2 Frågor relaterade till framtida istider

Generellt är det framtida istider som kommer att ha störst inverkan på förvaret. Ett antal slutsatser kan dras om inverkan av sådana förhållanden.

Frysning av en intakt buffert bedöms uteslutet – också för mycket pessimistiskt valda klimatförhållanden

Frysning av en intakt buffert bedöms uteslutet för båda platserna, även för mycket pessimistiskt valda klimatförhållanden. Vid den mest pessimistiska valda klimatutvecklingen vid Forsmark går det inte att helt utesluta frysning av en vattenfyld hålighet i en eroderad buffert. Beräkningarna visar dock att det mekaniska trycket på kapseln även i sådana fall förblir inom tillåtna gränser.

Kapselbrott på grund av isostatisk last bedöms uteslutet – också för mycket pessimistiskt valda klimatförhållanden

Kapselbrott på grund av isostatisk belastning under istider bedöms uteslutet för båda platserna, även för de största inlandsisar som beaktats.

Syrenedrägnings bedöms preliminärt som uteslutet – också för mycket pessimistiskt valda förhållanden

Grundvattenflödet ökar syrenedrägning till förvarsdjup under en inlandsis och kan förändra den gynnsamma reducerande kemiska miljön. Denna utveckling bedöms dock som utesluten utgående från de analyser som genomförts inom SR-Can. Detta resultat överensstämmer med slutsatserna från flera tidigare analyser. Modelleringsexemplet är dock stiliserat och förenklat. Det krävs därför ytterligare analyser för att öka tilltron till resultaten. Sådana studier kommer att genomföras inom ramen för SR-Site.

Riskbidraget från jordskalv bedöms som litet

Kapselbrott på grund av jordskalv kan inte uteslutas helt. Denna eventualitet ger dock ett litet riskbidrag. Analyserna visar att det i genomsnitt skulle dröja betydligt mer än en miljon år innan ens ett enda sådant kapselbrott inträffar.

Buffertmaterial kan förloras då bufferten utsätts för glaciala smältvatten, men omfattningen är osäker – ytterligare studier krävs

Det kan uppstå en betydande förlust av buffert genom kolloidbildning som följd av att glaciala smältvatten med låg salthalt tränger in – sett över ett tidsperspektiv på 100 000 år. Kunskapen om de aktuella processerna är begränsad och ytterligare forskning inom området prioriteras. En statusrapport ges i SKB:s Fud-program 2007.

Omfattande förlust av buffert kan leda till kapselbrott på mycket lång sikt

Förlust av buffertmassa, i sådan utsträckning att advektiva förhållanden börjar råda i bufferten, kan inte uteslutas på 100 000 års sikt. Detta skulle leda till ökad kapselkorrosionshastighet. Sett över en miljon år kan det bli frågan om några tiotal kapselbrott med den pessimistiska hydrogeologiska tolkningen av Forsmark, pessimistiska antaganden om sulfidkoncentrationer och försiktiga antaganden om acceptanskriterier för deponeringshål.

En förlängd period av tempererat klimat (ökad växthuseffekt) före nästa istid bedöms i huvudsak som positivt för förvarets säkerhet

Eftersom de processer som skulle kunna vara mest skadliga för förvarets säkerhet är relaterade till glaciala förhållanden skulle en förlängd period med tempererat klimat vara positivt för säkerheten. Detta gäller i synnerhet de båda huvudsakliga bidragen till den beräknade risken i SR-Can, nämligen *i*) potentiell buffererosion på grund av att glaciala smältvatten tränger in med därav följande ökad kapselkorrosion, och *ii*) större och fler jordskalv under avsmältningsav-

en inlandsis. Ytterligare utvärderingar behövs om den geokemiska utvecklingen vid en förlängd tempererad period. Detta skulle ge ökad tyngd åt slutsatsen att de geokemiska förhållandena skulle förbli gynnsamma.

7.3 Andra frågor relaterade till barriärkonstruktion och -funktion

Viktigt att undvika deponeringshål som skärs av stora eller starkt vattenförande sprickor – ytterligare studier krävs

De största riskbidragen i SR-Can gäller förekomst av stora och/eller höggradigt transmissiva sprickor som skär deponeringshålen. Detta gäller frigörelse av buffertkolloider och inverkan av större jordskalv i närheten av förvaret. Dessa två fenomen är relaterade till kapselbrott på grund av kapselkorrosion respektive till sekundära skjuvrörelser i berget. Eftersom transporttider för radionuklidor är kort i en stor och höggradigt transmissiv spricka ges sådana kapselbrott generellt stora konsekvenser. Sådana sprickor ska undvikas i den mån de hittas. Sannolikheten för sådana sprickor och sannolikheten för att olämpliga deponeringshål förblir upptäckta är i många avseenden svåra att kvantifiera. Resultatet av analysen är känsligt för dessa osäkerheter. Det är viktigt att fastställa välmotiverade acceptanskriterier för deponeringshål som grund för framtida analyser. Detta måste studeras både genom att man simulerar effekten av att tillämpa tänkbara kriterier, och genom att man undersöker om det är praktiskt möjligt att tillämpa kriterierna.

Värmen från kapseln kan orsaka sprickor i deponeringshålets vägg, vilket kan ge ökad in- och uttransport av lösta ämnen – ytterligare studier krävs

Termiskt inducerad spjälkning kring deponeringshål kan ha stor inverkan på materialutbytet mellan strömmande grundvatten och buffert, så länge diffusion är den dominerande transportmekanismen i bufferten. Om advektiva förhållanden råder i bufferten blir inverkan av spjälkningen mycket mindre tydlig eftersom spjälkningen då bara ger ett litet bidrag till det redan ökade flödet. Det råder osäkerhet kring omfattning och konsekvenser av spjälkning och ytterligare studier pågår.

Återfyllda deponeringstunnlar har begränsad betydelse som transportväg för radionuklidor

Betydelsen av den återfyllda deponeringstunneln som transportväg för radionuklidor är begränsad i jämförelse med sprickor som skär deponeringshålet. Även en försämring av återfyllningsmaterialet i deponeringstunnlarna har begränsade konsekvenser vad gäller radionuklidutsläpp från närrzonerna.

Sprängskador i berget kring deponeringstunneln har begränsad betydelse som transportväg för radionuklidor

Betydelsen av den sprängskadade zonen kring deponeringstunnlarna är begränsad i jämförelse med övriga transportvägar för radionuklidor, även vid mycket pessimistiska antaganden om zonen jämfört med vad som observerats för referensmetoden för bergbrytning.

Försiktiga brytningsmetoder rekommenderas ändå för deponeringstunnlar, eftersom konkurrerande transportvägar kan bedömas som mindre viktiga med stöd av ytterligare data, och eftersom slutsatserna om zonen ännu bygger på förenklad stiliserad modellering.

7.4 Beräknade individrisker

Beräknade individrisker för förvar vid Forsmark och Laxemar visas i figur 7-1. Tempererade förhållanden postuleras här för biosfären, medan det är sannolikt att platserna kommer att ligga under vatten eller vara täckta med is under en stor del av analysperioden på en miljon år. Därmed blir riskerna försumbara för dessa perioder. Dessutom görs flera pessimistiska antaganden, för att risken inte ska underskattas.

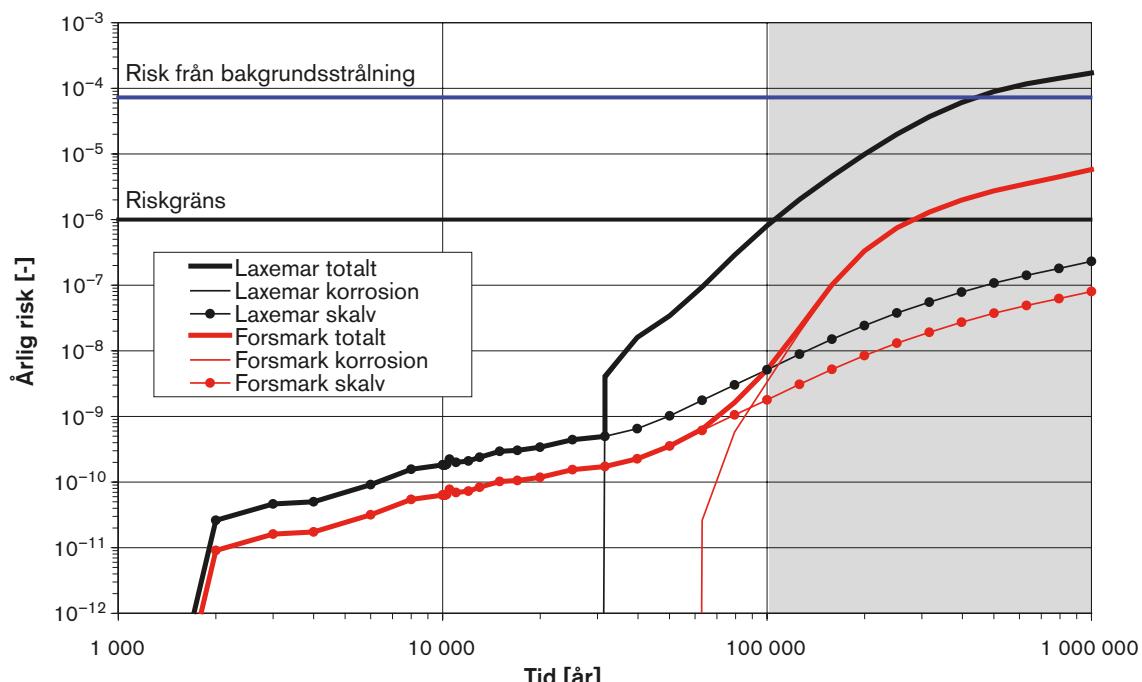
Kravuppfyllelse för den första glaciationscykeln

För den första glaciationscykeln har två riskbidrag identifierats; från jordskalv och från kapselbrott på grund av korrosion om bufferten har eroderats av glaciala smältvatten.

Sannolikheten för kapselbrott på grund av jordskalv under perioden är mycket låg och den sannolikheten ingår i riskuppskattningen.

Vad beträffar kapselbrott på grund av korrosion beräknas ett fåtal kapslar skadas under den första glaciationscykeln vid båda platserna. Maxvärdet för den totala beräknade risken upp till 100 000 år, det vill säga värdet vid 100 000 år, ligger nära myndigheterna riskgräns för Laxemar och cirka två storleksordningar lägre för Forsmark. Risken är pessimistiskt baserad på den som beräknats för kapselkorrosionsscenariot, där flera av osäkerheterna hanteras pessimistiskt på grund av otillräcklig förståelse för grundvattenflöde och grundvattensammansättning under glaciala förhållanden, och för buffertens reaktion på kontakt med glaciala grundvatten. Risken som beräknats för Forsmark bygger på en pessimistisk tolkning av den rådande hydrogeologiska situationen. Som nämnts tidigare kan det ifrågasättas om den hydrogeologiska modellen för Laxemar är tillräckligt representativ. Senare platsdata från kandidatområdena för förvar visar att de hydrogeologiska förhållandena är mer gynnsamma än de som används i modellen som utgör grund för SR-Can. Detta skulle minska riskbidraget från kapselbrott på grund av korrosion.

Man kan alltså dra slutsatsen att de beräknade riskerna för båda platserna uppfyller myndigheternas krav avseende den första glaciationscykeln efter förslutning.



Figur 7-1. Risksummering för de två platserna. Tempererade förhållanden postuleras för biosfären, medan det är sannolikt att platserna kommer att ligga under vatten eller vara täckta med is under en stor del av analysperioden på en miljon år vilket skulle ge försumbara doser. Flera andra osäkerheter bedöms pessimistiskt.

Förvarets funktion för tiden efter den första glaciationscykeln

Samma typer av kapselbrott som för den första glaciationscykeln bidrar till individrisk under perioden efter den första glaciala cykeln, upp till en miljon år efter förslutning.

För Forsmark ligger det beräknade riskbidraget från jordskalv mer än en storleksordning under myndigheternas gräns under hela analysperioden, medan ärenemot bidraget från korrosions-skador ligger över riskgränsen vid en miljon år.

För Laxemar är riskbidraget från jordskalv likt det för Forsmark, men bidraget från korrosions-skador ligger omkring två storleksordningar över riskgränsen vid analysperiodens slut.

SSI anger i sina allmänna råd för denna tidsperiod följande: ”En strikt kvantitativ jämförelse av beräknad risk mot föreskrifternas kriterium för individrisk [är] inte meningsfull.” Resultaten används som underlag för att diskutera hur pessimistiskt hanterade osäkerheter kan minskas och hur skyddsformågan för förvaret kan förbättras, så som anges i de allmänna råden.

Det är viktigt att observera att den beräknade risken visserligen överstiger riskgränsen som gäller för den första perioden på 100 000 år, men ändå är betydligt lägre än riskerna från den naturliga bakgrundsstrålningen under analysperioden för Forsmark. Även för Laxemar ligger riskerna betydligt under dem från bakgrundsstrålningen under flera hundra tusen år och blir jämförbar med riskerna från bakgrundsstrålningen först vid slutet av analysperioden på en miljon år. Dessutom har, på samma sätt som för den första glaciationscykeln, många frågor behandlats pessimistiskt och ytterligare kunskap kan medföra en betydande minskning av dessa riskuppskattningar i framtida analyser.

Man kan alltså dra slutsatsen att de beräknade riskerna för tiden efter den första glaciations-cykeln uppfyller myndigheternas krav för denna period.

7.5 Ytterligare resultat och slutsatser

Många ytterligare resultat har framkommit som gör det möjligt att dra slutsatser av analyserna i SR-Can:

- En första utvärdering har gjorts av inverkan på miljön från utsläpp av radionuklidor. De flesta radionuklidor ligger under en internationellt framtagen sovringsgräns, vilket betyder att inga ytterligare analyser behövs. I de mest pessimistiska beräkningsfallen kan ett fåtal nuklidor komma att överstiga gränsen vid analysperiodens slut. Detta kräver mer detaljerade analyser.
- Två alternativa säkerhetsindikatorer har använts som komplement till riskindikatorn: Utsläpps begränsningar från den finska tillsynsmyndigheten STUK och sammansättningen av naturligt förekommande radionuklidor i miljön kring förvaret.
- En första diskussion ges kring de aspekter av begreppet Bästa Tillgängliga Teknik (BAT – Best Available Technique) som kan belysas med hjälp av resultaten från säkerhetsanalysen.
- En uppsättning konstruktionsstyrande fall har sammanställts. Dessa ska användas som ett av flera underlag till konstruktionsförutsättningar för förvaret, till exempel för att fastställa krav på barriäregenskaper.
- Detaljerad återkoppling ges till fortsatt arbete med kapselkonstruktion och - tillverkning, till fortsatt arbete med förvarsutformning, till ytterligare platsundersökningar och platsmodellering, till SKB:s Fud-program och till nästa säkerhetsanalys, SR-Site.

7.6 Vilka frågor återstår?

SR-Can är ju ett förberedande steg för säkerhetsanalysen SR-Site. Mycket av materialet i SR-Can kan efter översyn förväntas vara i stort sett oförändrat i SR-Site, men det finns också viktiga delar som kommer att uppdateras:

- De platsbeskrivande modellerna kommer att bygga på data från de fullständiga platsundersökningarna. Speciellt för Laxemar betyder det att tilltron till platsmodellen kan förväntas bli betydligt bättre.
- För Forsmark kommer den hydrogeologiska tolkningen av berget att utvecklas. Analyserna i SR-Can visar att detta kan påverka riskbedömningen för platsen.
- Forskning kring buffererosion är ett prioriterat område och kunskapsunderlaget kommer att uppdateras i SR-Site. Detta kan komma att få stor inverkan på de slutliga riskbedömningarna för båda platserna.
- Nya rön kring termisk spjälkning förväntas tillkomma, både genom experiment och modellstudier.
- Mer perifera delar av förvarssystemet, som återfyllningen av områdena utanför deponeeringstunnlarna, pluggar i förvaret och förslutning av undersökningsborrhål har behandlats förenklat i SR-Can kommer att analyseras mer i detalj i SR-Site.
- Fler bränsletyper och bränslen med högre utbränningsgrader kommer att analyseras i SR-Site.
- Underlaget för att hävda att initialtillståndet kan åstadkommas på ett kvalitetssäkrat sätt kommer att förbättras till SR-Site. En mer kvalificerad bedömning av missöden vid tillverkning och installation av de tekniska barriärerna förväntas också till SR-Site.
- Metodiken för säkerhetsanalysen förväntas bli i stort sett densamma som i SR-Can. Kvalitetssäkringen av genomförandet av själva analysen kommer dock att drivas till en högre nivå än vad som varit fallet i SR-Can.

För närvarande (april 2007) pågår myndigheternas granskning av SR-Can. Resultatet förväntas i december 2007 och kommer naturligtvis att påverka innehåll och utformning av SR-Site.

7.7 Tilltro till säkerhetsargumentationen

7.7.1 Inledning

Säkerhetsanalysen SR-Can, som utgör en första värdering av säkerheten för KBS-3-förvar vid de båda kandidatplatserna Forsmark i Östhammar och Laxemar i Oskarshamn, visar att det finns goda utsikter att bygga säkra förvar vid dessa båda platser.

En tillämpning av dagens kunskap tyder på att de flesta, kanske alla, kapslar förblir tätta under hela miljonårsperioden som analysen omfattar. Kunskapsunderlaget är dock på en del punkter behäftat med osäkerheter. I sådana fall har underlaget tolkats pessimistiskt för att förvarets skyddsformåga säkert inte ska överskattas. Då visar resultaten att någon enstaka kapsel kan skadas i ett hundratusenårigt perspektiv och något tiotal i ett miljonårsperspektiv. De beräknade riskerna till följd av detta ligger under myndigheternas gränsvärden för båda platserna.

Kan vi då lita på vetenskapen? Och, mer generellt, vilken tilltro kan vi ha till resultatet av säkerhetsanalysen? Detta diskuteras i avsnitten 7.7.2 och 7.7.3 nedan.

Även om tilltron till analysens resultat är stark kan vi inte säkert utesluta att det finns något skadligt fenomen som vi idag inte känner till. Vad blir konsekvenserna om något trots allt förbisets? Den frågan tas upp i avsnitt 7.7.4.

7.7.2 Vetenskapen och tidperspektivet 100 000 år

Etthundra tusen år är en oerhört lång tid i jämförelse med det allra mesta vi är vana att röra oss med eller fundera över. Hur är det möjligt att säga något om ett slutförvar i det tidperspektivet?

En viktig del av svaret ligger i att förvaret är utformat så att det ska vara möjligt att analysera dess långsiktiga säkerhet i riktigt långa tidsperspektiv. Så har till exempel den geologiska miljön för förvaret valts på grund av att den varit stabil under mycket långa tider. Urberget vid platserna bildades för nästan 2 miljarder år sedan.

De tillverkade barriärerna – framför allt kapseln och lerbufferten – är gjorda av naturliga material som är stabila i den miljö förvarsberget erbjuder.

Förvaret är också dimensionerat med hänsyn till erfarenheter från tidigare analyser. Det gäller till exempel kopparkapslarnas tjocklek, gjutjärnsinsatsens hållfasthet, avståndet mellan kapslarna som säkerställer att det inte blir för varmt i förvaret och förvarsdjupet som bland annat valts så att förändringar på ytan inte ska ge skadliga effekter på djupet. Det är alltså i grunden inte förvånande att säkerhetsanalysen SR-Can kommer fram till att kopparkapslarna är tillräckligt tjocka och att kapslarnas gjutjärnsinsatser är tillräckligt hållfasta – även om detaljer i analysen är nya och kommer att förändras också till nästa säkerhetsanalys.

Naturvetenskapen utvecklas snabbt. Ofta kommer till exempel rapporter om nya rön kring en ökad växthuseffekt och det är lätt att konstatera att forskarna inom detta område inte har några färdiga svar om hur vårt klimat kommer att te sig om 100 år. Hur kan vi då veta att den kunskap vi idag använder för att beskriva förvarets utveckling och säkerhet är giltig också imorgon?

Detta är möjligt eftersom den vetenskapliga grunden för att värdera säkerheten för ett KBS-3-förvar i de allra flesta delar är mogen. Kunskaperna kring fenomen som radioaktivt sönderfall, kopparkorrosion, hållfasthet och grundvattnerrörelser är sedan länge etablerade inom forskarvärlden. Ny kunskap tillkommer ständigt, men inte på ett sådant sätt att de relativt enkla och basala rön säkerhetsargumentationen bygger på behöver revideras. Det ingår också i säkerhetsanalysens arbetsätt att ständigt värdera vilka osäkerheter olika delar av underlaget till analysen är behäftade med och att sedan inkludera dessa osäkerheter i bedömningen – ofta genom pessimistiska tolkningar.

Ett annat angreppssätt är att arbeta med flera olika scenarier – till exempel för det framtida klimatet. Förvaret behöver konstrueras så att det klarar en rad olika klimatsituationer eftersom vi bara kan veta ramarna inom vilka klimatet utvecklas – inte den detaljerade utvecklingen.

Det finns många exempel på att gammal vetenskap håller än idag. Newton utarbetade sin gravitationsteori på 1600-talet. Förståelsen av gravitationen genomgick sedan en revolution i början av 1900-talet då Einstein lade fram sin allmänna relativitetsteori. Einsteins teori förklrar många extrema gravitationsfenomen i universum där Newtons teori går bet. Ändå lärs Newtons enklare gravitationsteori ut i gymnasier och vid universitet, eftersom den mycket väl beskriver till exempel det allra mesta om planetbanorna i vårt solsystem. Trots att den fundamentala förståelsen för fenomenet gravitation revolutionerades med Einstein är alltså Newtons teori användbar och fullt tillräcklig för att beskriva många gravitationsfenomen. En revolution i förståelsen leder därför inte med nödvändighet till att gamla beskrivningar blir otillräckliga.

Ett annat exempel är de matematiska lagarna för radioaktivt sönderfall. Dessa formulerades i slutet av 1800-talet. Man förstod visserligen då inte i grunden hur sönderfallet gick till, men de matematiska lagarna som beskriver sönderfallet kunde ändå formuleras – och det är precis dessa lagar som används till beräkningarna i avsnitten 2.4 till 2.6. Under 1900-talet, genom kärnfysikens utveckling, fick man sedan en detaljerad förståelse för hur sönderfallet i atomkärnan går till. Detta var ett betydande och på sitt sätt dramatiskt framsteg, men det ledde inte till att de matematiska lagarna som beskriver sönderfallet behövde ändras.

På liknande sätt förhåller det sig med mycket av den kunskap säkerhetsanalysen lutar sig emot.

7.7.3 Tilltro till analysens resultat

Den vetenskapliga mognaden i underlaget till säkerhetsanalysen är en aspekt av en mer generell fråga: Vilken tilltro kan vi ha till analysens resultat? Hur kan vi säkerställa att förvaret från början har de egenskaper som avsett? Hur vet vi att platserna är tillräckligt väl kända? Hur mogen är kunskapen om de processer i förvaret och i omgivningen som på lång sikt styr förvarets utveckling? Hur säkerställer vi att de modeller och data som används i säkerhetsanalysens beräkningar är tillförlitliga och ändamålsenliga?

Nedan listas i korthet argumenten för tilltro, så som de kan formuleras baserat på analysen SR-Can.

- De tekniska delarna av förvarssystemet är baserade på teknik som, i varierande utsträckning, demonstreras fungera och på etablerade kvalitetssäkringsprocedurer, för att uppnå systemets *initialtillstånd*, det vill säga tillståndet omedelbart efter förslutning. Detta dokumenteras systematiskt i **Initialtillståndsrapporten** och sammanfattas i kapitel 3. Exempel på viktiga aspekter på de tekniska barriärernas initialtillstånd är:
 - a. kopparkapslarnas förslutningskvalitet,
 - b. gjutjärnsinsatsernas gjutkvalitet,
 - c. buffertens egenskaper till exempel densitet och föroreningshalter,
 - d. återfyllningens egenskaper till exempel densitet och föroreningshalter,
 - e. brytningsmekanismens kvalitet – vilken säkerställer att berget inte skadas på ett sätt som påverkar den långsiktiga säkerheten negativt,
 - f. deponeringmekanismens kvalitet – vilken säkerställer att alla komponenter deponeras som avsett med nödvändiga kvalitetskontroller.
- Tilltro till de platsbeskrivande modellerna och tilltro till förståelsen av platsen uppnås genom ett systematiskt och kvalitetssäkrat program för platsundersökningar och platsmodellering. Tilltron till platsmodellen bedöms och dokumenteras i rapporteringen av den platsbeskrivande modellen och begränsas i SR-Can till vad som är näbart för en modell baserad på data från den inledande fasen av platsundersökningarna. Nyckelegenskaper för platserna beskrivs i avsnitt 3.4.
- Tilltron till den vetenskapliga förståelsen för förvarets utveckling bygger i huvudsak på decennier av dokumenterat forsknings- och utvecklingsarbete för att förstå förvarsutveckling och säkerhet, vilket ger förståelse för nyckelprocesser som korrosion och andra skadliga processer för kapseln, samt för nyckelfenomen som är styrande för fördämpningen. Denna kunskap dokumenteras i SR-Can systematiskt på ett format lämpat för säkerhetsanalysen, i synnerhet i de tre **processrapporterna** för barriärerna och i **klimatrapperten**.
- Förståelsen för säkerhet bygger på en systematisk identifiering av säkerhetsfunktioner och kvantitativa kriterier för att avgöra om säkerhetsfunktionerna upprätthålls, se avsnitt 3.5.
- Förvarsutvecklingen analyseras med ett strukturerat angreppssätt i flera tidsskalor. I varje tidsskala behandlas de processer som har identifierats som relevanta för säkerheten. Säkerheten för systemet, uttryckt som säkerhetsfunktioner, står i fokus för analyserna, se kapitel 5. Dataosäkerheter dokumenteras i **Datarapporten** enligt en etablerad mall. Kvalitetssäkring av modeller och modellering uppnås genom att följa procedurer som dokumenteras i **Modellrapporten**.
- Den vidare analysen delas upp i en uppsättning scenarier som har till syfte att fullständigt genomlysa alla tänkbara sätt på vilka de identifierade säkerhetsfunktionerna skulle kunna gå förlorade. Se vidare kapitel 6.
- En kvalitetssäkringsplan som innefattar många av rutinerna som följs i de ovan beskrivna stegen har etablerats och till stora delar tillämpats i SR-Can. Detta är en del av den övergripande metodiken som tillämpas i analysen, så som beskrivs i avsnitt 4.2.

Fullständighet

I diskussionen om tilltro är det också viktigt att ta upp frågan om analysens fullständighet. Denna aspekt kan belysas genom följande frågor:

1. Har alla faktorer som är relevanta för den långsiktiga säkerheten identifierats?
2. Har alla identifierade faktorer behandlats på korrekt sätt i analysen?

Följande två punkter sammanfattar ansträngningarna att säkerställa att alla relevanta faktorer har identifierats:

- Decennier av systematisk och dokumenterad forskning och utveckling har utförts i internationellt samarbete för att nå tillräcklig kunskap om förvarssystemet och dess utveckling. Under senare år har få nya fenomen identifierats, vilket tyder på att den vetenskapliga och tekniska grunden är stabil. Vi har genomfört flera säkerhetsanalyser genom åren för att få en integrerad utvärdering av kunskapsbasen och för att ge återkoppling till forskningsprogrammet.
- Vi har noga följt utvecklingen av olika slutförvarslösningar och säkerhetsanalyser i andra länder, även för de fall då slutförvarslösningen är anpassad till geologiska miljöer som avviker från den svenska urberggrundens. De olika faktorer som skulle kunna tänkas påverka säkerheten hos dessa olika slutförvar finns, bland annat, dokumenterade i internationella så kallade FEP-databaser. Vi har systematisk jämfört innehållet i dessa databaser med de faktorer och fenomen som behandlas i SR-Can.

Frågan huruvida alla identifierade frågor har behandlats korrekt i analysen tas delvis upp i diskussionen om tilltro ovan. Ett mera komplett svar ges av den fullständiga beskrivningen av metodiken för analysen i kapitel 2 i huvudrapporten för SR-Can. Särskilt avsnitt 2.7.3 i huvudrapporten är viktigt i detta sammanhang.

Det som nämnts ovan ger stöd för att analysen i SR-Can är tillräckligt omfattande, medan fullständighet i strikt mening aldrig kan bevisas. Det är därför relevant att diskutera möjliga konsekvenser av att fullständighet inte uppnås, till exempel om en viktig skadlig process inte identifieras, trots alla ansträngningar att garantera motsatsen. I sin mest extrema form skulle en sådan diskussion kunna handla om konsekvenserna av fullständig förlust av säkerhetsfunktioner på ett tidigt stadium. Som framgår av avsnittet som följer skulle även extrema och fullständigt orealistiska antaganden vad gäller tidig förlust av barriärfunktioner ge doser som i storlek är jämförbara med dem som orsakas av bakgrundsstrålningen.

7.7.4 Gränssättande fall

I avsnitt 6.12 beskrivs ett antal stiliserade gränssättande fall, där en tidig och total förlust av viktiga säkerhetsfunktioner analyseras. Följande illustrativa, orealistiska fall beräknades för ett förvar i Forsmark:

- En stor öppning i kopparhöljet vid förslutning av förvaret *för alla kapslar*.
- En avsaknad av buffertmaterial, tillräcklig för att omintetgöra buffertens funktion att förhindra flöde av grundvatten genom deponeringshålet vid förslutning av förvaret och *för alla deponeringshål*.
- En kombination av ovan nämnda två fall, det vill säga en stor öppning i *alla kapslar* och avsaknad av buffert i *alla deponeringshål* vid förslutning av förvaret.

Flera pessimistiska antaganden, förutom de helt hypotetiska förlusterna av barriärfunktioner, har gjorts i beräkningarna av dessa fall.

Resultaten i avsnitt 6.12.2 visar att beräknade doser understiger dosen från den naturliga bakgrundsstrålningen, även vid mycket omfattande förluster av säkerhetsfunktioner. Till exempel ger en tidig, total förlust av kapsel och buffert i samtliga deponeringshål vid Forsmark doser som är jämförbara med dem från den naturliga bakgrundsstrålningen.

Detta resultat sätter också en viktig gräns för vad som skulle kunna hända om vi trots alla ansträngningar inte lyckats identifiera någon viktig process som skulle kunna vara skadlig för förvarets säkerhet.

Resultaten kan inte på vetenskaplig grund vägas in i riskanalysen för förvaret – processerna som eventuellt skulle gränssättas på detta vis är ju okända – men genom beräkningsfall som dessa kan man i viss mån ändå uttala sig om ”betydelsen av det okända”.

7.8 Slutord

Det är uppenbart att en säkerhetsanalys till stor del baserar sig på djupa och detaljerade insikter i de vetenskapliga och tekniska områden som krävs för att genomföra analysen. I en förenklad sammanställning som denna är det möjligt att beskriva argumentationen, analyserna och de resultat som framkommit. En sådan beskrivning är också en viktig grund för det öppna samrådet som måste föregå ett samhällsbeslut kring en stor miljöfråga med ett långsiktigt perspektiv och där berörda aktörer har olika kunskapsbakgrund.

Det är dock svårt att för en läsare utan specialistkunskaper bevisa riktigheten i de flesta beräkningar och resultat i en säkerhetsanalys. Detta måste avgöras av experter vid i första hand de myndigheter som har att granska säkerhetsanalysen.

Denna belägenhet delar kärnavfallsfrågan med rader av andra tekniskt/vetenskapliga frågor i vårt specialiserade samhälle. I frågor som rör till exempel klimatförändringar eller avancerade medicinska behandlingar kan vi lyssna till experter och bilda oss en informerad åsikt som avgörs inte bara av vad experterna säger och vår tilltro till dem, utan också av våra grundläggande värderingar. Men i dessa frågor liksom i kärnavfallsfrågan är vi som medborgare alltid i någon mening hänvisade till specialister inom vetenskap och industri och till experterna vid de organ samhället inrättat för att granska och bedöma riktigheten i ett vetenskapligt underlag.

8 Referenser

Materialet i denna rapport bygger på de referenser som listas nedan.

Huvudrapporten SR-Can

Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation.
Main Report of the SR-Can project. SKB TR-06-09, Svensk Kärnbränslehantering AB, 2006.

Huvudreferenser till SR-Can

FEP report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-20,
Svensk Kärnbränslehantering AB, 2006.

Initial state report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-21,
Svensk Kärnbränslehantering AB, 2006.

Fuel and canister process report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-22,
Svensk Kärnbränslehantering AB, 2006.

Buffer and backfill process report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-16,
Svensk Kärnbränslehantering AB, 2006.

Geosphere process report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-19,
Svensk Kärnbränslehantering AB, 2006.

Climate and climate related issues for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-23,
Svensk Kärnbränslehantering AB, 2006.

Model summary report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-26,
Svensk Kärnbränslehantering AB, 2006.

Data report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-25,
Svensk Kärnbränslehantering AB, 2006.

Handling of future human actions in the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-24,
Svensk Kärnbränslehantering AB, 2006.

Platsbeskrivande modeller version 1.2 för Forsmark och Laxemar

Preliminary site description. Forsmark area – version 1.2. SKB R-05-18,
Svensk Kärnbränslehantering AB, 2005.

Preliminary site description. Laxemar subarea – version 1.2. SKB R-06-10,
Svensk Kärnbränslehantering AB, 2006.

SSI:s och SKI:s föreskrifter

Statens strålskyddsinstituts föreskrifter om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall, SSI FS 1998:1,
Statens strålskyddsinstitut, 1998.

Statens strålskyddsinstituts allmänna råd om tillämpning av föreskrifterna (SSI FS 1998:1) om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall, SSI FS 2005:5, Statens strålskyddsinstitut, 2005.

Statens kärnkraftinspektion föreskrifter om säkerhet vid slutförvaring av kärnämne och kärnavfall, SKIFS 2002:1, Statens kärnkraftinspektion, 2002.

Statens kärnkraftinspektion allmänna råd om tillämpningen av föreskrifterna om säkerhet vid slutförvaring av kärnämne och kärnavfall (SKIFS 2002:1), Statens kärnkraftinspektion, 2002.

Underlag till kapitel 2

Hedin A, 1997. Använt kärnbränsle – hur farligt är det? SKB R-97-02,
Svensk Kärnbränslehantering AB.