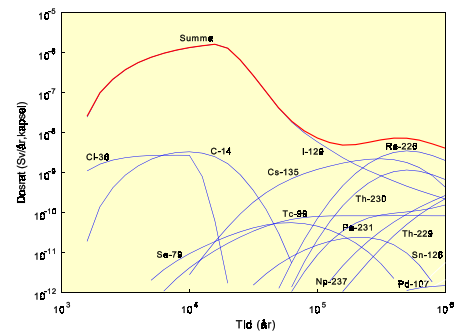
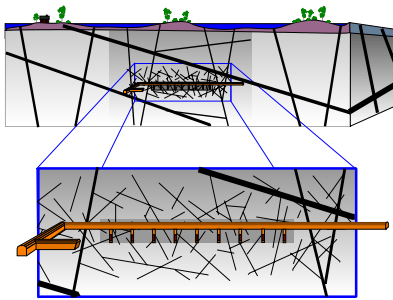


SKI SITE-94

Säkerhetsanalysprojekt för djupförvar i kristallint berg



Sammanfattning

December 1997

ISSN 1104-1374
ISRN SKI-R--97/6--SE

SKI Rapport 97:6

SKI SITE-94

Säkerhetsanalysprojekt för djupförvar i kristallint berg

Sammanfattning

December 1997

FÖRORD

SKI genomförde mellan 1992 och 1997 ett forskningsprojekt, benämnt SITE-94, kring slutförvaring av använt kärnbränsle. SITE-94 var upplagt som en säkerhetsanalys av ett hypotetiskt slutförvar och använde platsdata från de markbaserade undersökningarna som Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) genomfört vid Äspö berglaboratorium. SITE-94 syftade bl.a. till att bygga upp SKIs kompetens i säkerhetsanalys inför kommande granskningar av kärnkraftindustrins tillståndsansökningar för ett djupförvar.

Arbetet med SITE-94 genomfördes av en projektgrupp inom avdelningen för kärnavfall på SKI tillsammans med ett antal svenska och utländska konsulter. Till projektet knöts också en styrgrupp (inom SKI) och en rådgivande expertgrupp. Medlemmarna i expertgruppen var Mick Apted, Neil Chapman (båda QuantiSci) och Ghislain de Marsily (Université de Paris). Projektet genomfördes med avdelningschef Sören Norrby som uppdragsansvarig och med följande medlemmar av projektgruppen:

Johan Andersson ¹	(projektledare 1992-1995; scenarier)
Björn Dverstorp	(projektledare 1995-1997; hydrogeologi, datahantering)
Fritz Kautsky	(geologi, bergmekanik)
Christina Lilja	(radionuklidtransport i närområdet, kapselfrågor)
Rolf Sjöblom ²	(kapselfrågor)
Benny Sundström	(radionuklidtransport i geosfären, grafik)
Öivind Toverud	(förvarskoncept)
Stig Wingefors	(bränsle, geo- och radiokemi)

1) nu vid Golder Associates i Stockholm

2) nu vid ÅF Energi Stockholm

Ett stort antal externa konsulter bidrog till ett framgångsrikt slutförande av projektet. Karin Pers (Kemakta) hjälpte till med SKIs beräkningar av radionuklidtransport i närområdet. Slutrapporten (på engelska) författades av SKIs projektgrupp med hjälp av bl.a. Neil Chapman (QuantiSci), Randy Arthur (QuantiSci) och Joel Geier (Golder Associates/Clearwater Hardrock Consulting). Timo Vieno (Technical Research Center of Finland) och Philip Maul (QuantiSci) bidrog med en teknisk granskning av manuskriptet till slutrapporten.

Denna rapport utgör en fristående svensk sammanfattning av slutrapporten för SITE-94. Rapporten har tagits fram av Kjell Andersson (Karinta-Konsult) i samarbete med SKIs projektgrupp. Dokumentationen av SITE-94-projektet omfattar, utöver slutrapporten och den svenska sammanfattningen, 50 tekniska bakgrundsrapporter (på engelska). SKI har även tagit fram broschyrmaterial som beskriver uppläggningsen av säkerhetsanalyser.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	Inledning	1
2	Metodik	6
3	Använt kärnbränsle	16
4	Äspö	19
5	Slutförvaret	21
6	Äspödata	25
7	Platsutvärdering	27
8	De tekniska barriärerna	42
9	Identifiering av scenarier	45
10	Geosfärens utveckling	49
11	Närområdets utveckling	58
12	Radionuklidkemi	65
13	Modeller för transport av radionuklider	68
14	Biosfären och dosberäkningar	72
15	Beräkningsfall i konsekvensanalysen	74
16	Resultat från konsekvensanalysen	77
17	Resultatens betydelse	81
18	Slutsatser	83
Bilaga 1	Ordförklaring	89
Bilaga 2	SITE-94 underlagsrapporter	95

1 INLEDNING

Denna rapport utgör en sammanfattning av projektet SITE-94, som genomfördes av Statens kärnkraftinspektion (SKI) under perioden 1992 till 1996. En fullständig redovisning av projektet återfinns i slutrapporten SKI Rapport 96:36. Avsikten med denna rapport är att den skall ge en översikt över hela projektet, dess mål, innehåll och slutsatser och kunna läsas fristående från slutrapporten.

1.1 BAKGRUND TILL SITE-94

Kärnkraftinspektionen har till uppgift att utöva tillsyn inom det kärntekniska området. Detta innebär bl.a. att inspektionen har att ta ställning till säkerheten hos såväl befintliga anläggningar som ansökningar till nya, vilket regleras i kärntekniklagen. Vad gäller djupförvar för radioaktivt avfall har Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) senast presenterat sina planer i FUD-Program 95 (FUD=Forskning, Utveckling och Demonstration). Enligt detta program kommer SKI att strax efter sekelskiftet få en ansökan från SKB att påbörja detaljundersökning på en plats för att undersöka om den är lämplig för ett djupförvar. Detaljundersökningen innebär omfattande undersökningar på platsen med bland annat tunnlar på förvarsdjup. Enligt regeringsbeslut skall detaljundersökningen ses som ett första led i uppförandet av en kärnteknisk anläggning. I praktiken innebär detta att SKI vid denna tidpunkt måste vara beredd att granska säkerheten hos ett djupförvar på den av SKB föreslagna platsen och ge regeringen förslag till beslut i ärendet.

Jämförelser av resultat från säkerhetsanalyser med kriterier och normer kommer att utgöra en viktig del av underlaget för ett sådant beslut. I SKIs granskning av en tillståndsansökan blir således säkerhetsanalysen en central del. Också före denna tidpunkt har SKI ett allmänt behov av att granska säkerhetsanalyser. I SKIs uppgifter ingår även att ta fram föreskrifter bl.a. för säkerhetsanalysernas utformning och att också fortsättningsvis yttra sig till regeringen över SKBs FUD-program.

Säkerhetsanalysen har således en central funktion i SKIs arbete inom kärnavfallsområdet. Detta innebär att inspektionen måste utveckla sin kompetens och sina resurser på området. Ett sätt att åstadkomma detta är att genomföra egna projekt där kunskaperna inom olika områden prövas och integreras på liknade sätt som måste ske vid granskning. Mot denna bakgrund beslöt SKI år 1992 att genomföra forskningsprojektet SITE-94.

1.2 ANSVARFÖRHÅLLANDEN

För all kärnteknisk verksamhet är det enligt kärntekniklagen anläggningsägarna som har ansvaret för säkerheten. När det gäller använt kärnbränsle och radioaktivt avfall tar industrin detta ansvar genom SKB, som ägs gemensamt av kraftbolagen. Detta innebär att SKB skall genomföra den forsknings- och utvecklingsverksamhet som behövs för säker hantering och slutförvaring.

SKI är tillsynsmyndighet på området vilket bl.a. innebär att SKI skall granska och pröva SKBs förslag till lösningar. För att kunna fullgöra denna skyldighet har SKI ett forskningsanslag till sitt förfogande. Projektet SITE-94 har genomförts och finansierats genom detta forskningsanslag. Det är viktigt att se SITE-94 med denna utgångspunkt, således som ett forskningsprojekt. Projektet är inte en del av arbetet med att utveckla lösningar för slutförvaring, vilket är SKBs ansvar.

SKIs arbeten med säkerhetsanalyser syftar till att stödja myndighetens tillsynsverksamhet. Erfarenheterna från SITE-94 kommer därvid bland annat att kunna utnyttjas av SKI vid framtagande av föreskrifter för säkerhetsanalys. Det förtjänar att framhållas att myndigheter i andra länder, t.ex. Storbritannien och USA, med liknande uppgifter som SKI också genomför egna säkerhetsanalyser. Således har USAs kärnkraftinspektion Nuclear Regulatory Commission, NRC, publicerat egna säkerhetsanalyser av de lösningar som föreslås i USA.

Huvudlinjen för SKBs utveckling av ett slutförvar för använt kärnbränsle, den s.k. KBS-3-metoden, bygger på ett flerbarriärsystem där det använda kärnbränslet innesluts i en långlivad kopparkapsel som placeras i kristallin berggrund på ett för säkerheten tillräckligt stort djup och som där omges av ett skyddande lager av bentonitlera.

Frågan om ett djupförvar skall få uppföras på en bestämd plats kommer att bli föremål för prövning enligt flera lagar och involvera ett antal myndigheter. Av särskild betydelse för SKIs prövning enligt kärntekniklagen är den angränsande strålskyddslagen enligt vilken Statens strålskyddsinstitut, SSI, har tillsynsansvar. Enligt gällande ordning är SSI remissorgan till SKI inför tillstånd om att uppföra en kärnteknisk anläggning. Vidare prövar SSI självt villkor för drift enligt strålskyddslagen. Säkerhetsanalysen omfattar radioaktiva ämnens spridning i biosfären, ett område där SSI har kompetensen. Institutet har deltagit i SITE-94 projektet, särskilt vad gäller biosfärsområdet.

1.3 TIDIGARE ERFARENHETER

SKI genomförde under åren 1986-1991 Projekt-90 med liknande övergripande målsättningar som SITE-94, d.v.s. att bygga upp kompetens och resurser för SKIs regulativa verksamhet. Projektet genomförde en säkerhetsanalys av ett djupförvar av KBS-3 typ placerat på en hypotetisk plats med egenskaper som förutsattes vara typiska för svenska förhållanden. Projektet visade på områden där betydelsen av osäkerheter kunde vara särskilt viktiga för resultaten av en säkerhetsanalys, även om ett normalfall gav låga beräknade doser. Andra slutsatser var att särskilda insatser behövdes för att stärka analysen av olika scenarier och för att utveckla metoder för kvalitetskontroll inom säkerhetsanalysen.

Det faktum att Projekt-90 utnyttjade en "hypotetisk plats" för ett djupförvar innebar en betydande begränsning. Projektet granskades efteråt på SKIs initiativ av en expertgrupp som tillsattes av OECD/NEA (Nuclear Energy Agency). Expertgruppen noterade också denna begränsning och ifrågasatte på denna grundval en del av slutsatsernas allmängiltighet. Expertgruppen ansåg också att Projekt-90 borde ha ägnat mer uppmärksamhet åt möjliga mekanismer för fel på kopparkapseln. Beträffande

scenarieanalysen menade expertgruppen att Projekt-90 gjort en bra insats men att ytterligare utveckling behövdes. Det har varit SKIs ambition att ta till vara de synpunkter som OECD/NEA framförde på Projekt-90.

1.4 PROJEKTETS MÅLSÄTTNING

Det övergripande målet med SITE-94 har varit att utveckla SKIs kunskaper, metoder och verktyg för säkerhetsanalysen. Detta har berört främst tre områden: säkerhetsanalysens metoder, platsutvärdering och kapselns egenskaper. När det gäller *säkerhetsanalysens metoder* fanns två delmål:

- att utveckla och testa metodik för att analysera scenarier och för att hantera tillhörande osäkerheter,
- att utveckla procedurer för genomförandet av en säkerhetsanalys som ger god spårbarhet vad avser information, beslut och aktiviteter i övrigt som skulle kunna ingå i ett system för kvalitetssäkring.

Beträffande *platsutvärdering* har det gällt att öka insikterna i hur plats specifika data kan föras in i säkerhetsanalysen och hur osäkerheter i data påverkar dess resultat. Delmål har därvid varit att:

- förbättra spårbarheten i hur platsdata överförs från rena mätdata till indata i säkerhetsanalysen,
- föreslå och testa analysverktyg för att hantera data och modellosäkerheter,
- öka överensstämmelsen i hur geologi, hydrogeologi, bergmekanik och geokemi används för att beskriva platsens utveckling under långa tider.

När det gäller *kapselns egenskaper* har målet varit att identifiera och så långt som möjligt analysera mekanismer som kan påverka långtidsbeständigheten.

Slutligen har SITE-94 haft målet att *utbilda och träna SKIs personal* i att genomföra och granska säkerhetsanalyser. Detta har gällt säkerhetsanalysen i sin helhet, men framför allt scenarieanalys och beräkningar av radionuklidtransport, som kan sägas utgöra kärnan i en säkerhetsanalys.

1.5 PROJEKTETS GENOMFÖRANDE

Liksom Projekt-90 har analysen i SITE-94 gjorts på det av SKB föreslagna konceptet för ett djupförvar, den s.k. KBS-3 metoden. Till skillnad från Projekt-90 har det hypotetiska förvaret placerats på en verklig plats, närmare bestämt vid SKBs Äspölaboratorium. Denna plats har undersökts ingående och har en rik tillgång på mätdata. SKI har haft tillgång till SKBs databas för platsen, och har kunnat göra egna tolkningar av data för tillämpning i

säkerhetsanalysen. Det bör betonas att Äspö är platsen för ett forskningslaboratorium och att den inte kommer att användas för ett slutförvar.

KBS-3 metoden, som innebär deponering av kopparkapslar i bergtunnlar på ca 500 meters djup, har accepterats av SKI och regeringen som huvudalternativ för det fortsatta utvecklingsarbetet. Det måste dock betonas att man inte har tagit slutlig ställning till metodvalet.

1.6 RAPPORTENS INNEHÅLL

Denna rapport följer indelningen i slutrapporten från SITE-94 (SKI Rapport 96:36). Rapportens struktur och allmänna uppläggning anger vad SKI menar att en säkerhetsanalys bör innehålla. Vad gäller balansen mellan hur ingående olika delar behandlas i denna rapport, liksom i huvudrapporten, ger däremot SITE-94 inte någon vägledning för framtida säkerhetsanalyser. SITE-94 har som forskningsprojekt valt att fokusera på vissa områden, t.ex. utvärdering av platsspecifika data för användning i säkerhetsanalysen, metodik för val av scenarier samt beräkningar av radioaktiva ämnens transport i tekniska barriärer och geosfär. Andra områden är därför jämförelsevis mindre utförligt behandlade än de kommer att vara i säkerhetsanalyser som skall ligga till grund för beslut.

I kapitel 2 beskrivs den metodik som använts i SITE-94. Där diskuteras säkerhetsanalysens målsättningar över huvud taget och i relation till de kriterier som kan ställas upp för ett djupförvars säkerhet. Vidare beskrivs den metodik som använts för den övergripande systembeskrivningen med scenarieanalys och behandling av osäkerheter.

Kapitel 3-8 beskriver det djupförvarssystem som behandlats i SITE-94, allt från det använda bränslet till egenskaper hos naturliga och tekniska barriärer.

Säkerhetsanalysen kan inte ingående behandla alla tänkbara framtida händelser och förlopp som kan påverka förvaret. Man måste ha en metodik för att välja vad man skall fokusera analysen på. Det gäller då först att identifiera de egenskaper hos förvaret självt som kan påverka dess framtid, sedan att identifiera möjliga händelser som kan påverka det utifrån. Slutligen avgörs vilka händelser (scenarier) som skall analyseras närmare. Den metodik som använts för detta inom SITE-94 beskrivs i kapitel 9.

Kapitel 10 till 14 behandlar hur scenarierna analyseras med modeller för systemets olika delar. Modellbeskrivningen omfattar de tekniska barriärerna, berg och grundvatten, dels i förvarets omedelbara närhet (närområdet) och dels utanför förvaret (geosfären), samt biosfären. Viktiga processer, deras inbördes växelverkan och påverkan på hur radioaktiva ämnen kan frigöras från förvaret och transporteras genom berget och nå biosfären, beskrivs. Behandlingen i dessa kapitel resulterar i en konsekvensanalys i form av ett antal beräkningsfall som preciseras i kapitel 15. Beräkningarna omfattar transport av radioaktiva ämnen från förvaret till biosfären samt de stråldoser till människor i en "kritisk grupp" som dessa ämnen kan ge upphov till. I kapitel 16 redovisas sedan resultaten av dessa beräkningar i konsekvensanalysen.

Kapitlen 17 och 18 avslutar rapporten med diskussion och slutsatser. För en mer detaljerad redogörelse för SITE-94 hänvisas till SKI Rapport 96:36. Till den finns ett antal underlagsrapporter, som redovisas i **Bilaga 2**. I **Bilaga 1** förklaras några av de facktermer som förekommer i denna sammanfattning.

2 METODIK

Syftet med säkerhetsanalysen är att den skall ge underlag för beslutsfattande. Ett viktigt beslut, där säkerhetsanalysen kommer att spela en central roll, kommer att bli om ett slutförvar skall byggas på den plats som SKB föreslår. Innan dess kommer säkerhetsanalyser att användas vid olika tillfällen, t.ex. i olika skeden av platsvalet.

Utvärdering av säkerheten hos ett djupförvar kommer att omfatta många olika discipliner. Säkerhetsanalysen erbjuder ett strukturerat sätt att sammanställa och redovisa information från alla dessa områden till ett underlag för att bedöma ett slutförvars långsiktiga säkerhet. Säkerhetsanalysen är också en länk mellan grundläggande vetenskap och beslutfattare genom att den prövar vad kunskaperna inom olika områdena betyder för säkerheten.

2.1 PROCESSYSTEM OCH SCENARIER

Säkerhetsanalysen beskriver ett system som består av djupförvaret självt och dess omgivning, och som ofta indelas i tre områden: tekniska barriärer, geosfären och biosfären. *De tekniska barriärerna* består av de använda bränslet självt och tillverkade barriärer i djupförvaret. I fortsättningen inkluderar vi de delar av berget som direkt kan påverkas av förvaret och de tekniska barriärerna i begreppet "*närområdet*". *Geosfären* är det omgivande berget (förutom den del som räknas in i de tekniska barriärerna), som behöver analyseras bl.a. med avseende på grundvattenströmning och transport av radioaktiva ämnen. Geosfären skall också skydda de tekniska barriärerna så att deras funktion bibehålls. *Biosfären* utgörs av recipienter (t.ex. brunn, insjö eller mosse), som kan ta emot radioaktiva ämnen från förvaret, och biologiska processer som kan överföra de radioaktiva ämnena till människor.

De tekniska barriärerna skall isolera de radioaktiva ämnena så att de inte släpps ut till omgivningen. Sådana utsläpp kan emellertid inte utslutas, t.ex. om någon kapsel skulle vara defekt. Ett djupförvars säkerhet beror således också på systemets förmåga att skydda människor och miljö om utsläpp av radioaktiva ämnen skulle förekomma. Det betyder att säkerhetsanalysen skall undersöka hur sådana utsläpp påverkas av förhållanden inom och utom förvaret. SITE-94 använder beteckningen *FEP* som ett samlande begrepp på sådana förhållanden. Begreppet kommer från engelskan där det står för "Features, Events and Processes", som kan översättas med Egenskaper, Händelser och Processer. En *egenskap* hos förvaret kan vara bergets genomsläpplighet för grundvatten. En *händelse* kan t.ex. vara en jordbävning, medan kopparkapslars korrosion är exempel på en *process*.

I säkerhetsanalysen ingår således en beskrivning av hur FEPs påverkar utsläpp av radioaktiva ämnen till biosfären som kan ge konsekvenser på människa och miljö. Generellt gäller att i varje analys av ett system måste man avgränsa systemet, ge det systemgränser. Utan en sådan avgränsning skulle analysen bli praktiskt omöjlig att genomföra, då den skulle omfatta all tänkbara FEPs i universum som på något sätt skulle kunna påverka förvaret. I SITE-94 används begreppet *Processsystem* för de FEPs som ingår i det analyserade systemet. Processsystemet innehåller FEPs för tekniska barriärer och geosfär. Biosfären ligger utanför processsystemet i SITE-94, där den ges en förenklad behandling i

form av s.k. **överföringsfaktorer**. Dessa faktorer anger hur ett beräknat inflöde till biosfären av radioaktiva ämnen skall omräknas till stråldos till människan.

Oavsett systemavgränsningar måste man emellertid beakta vissa FEPs som ligger utanför processsystemet. Dessa FEPs kallas i SITE-94 **yttre händelser och förhållanden**. Exempel på yttre händelser är uppkomsten av permafrost i området vid förvaret, vilket kan påverka hydrologi och därmed transporten av radionuklider, och mänskligt intrång i förvaret. Yttre händelser och förhållanden ger upphov till **scenarier** för systemets framtida utveckling.

Säkerhetsanalysen syftar till att beskriva en "riskbild" av slutförvaret och hur det utvecklas i framtiden. Beskrivningen görs genom att modellera processsystem och scenarier för att slutligen beräkna vilka utsläpp av radioaktiva ämnen som kan uppstå. I grova termer kan man säga att säkerhetsanalysen består av följande fyra delar:

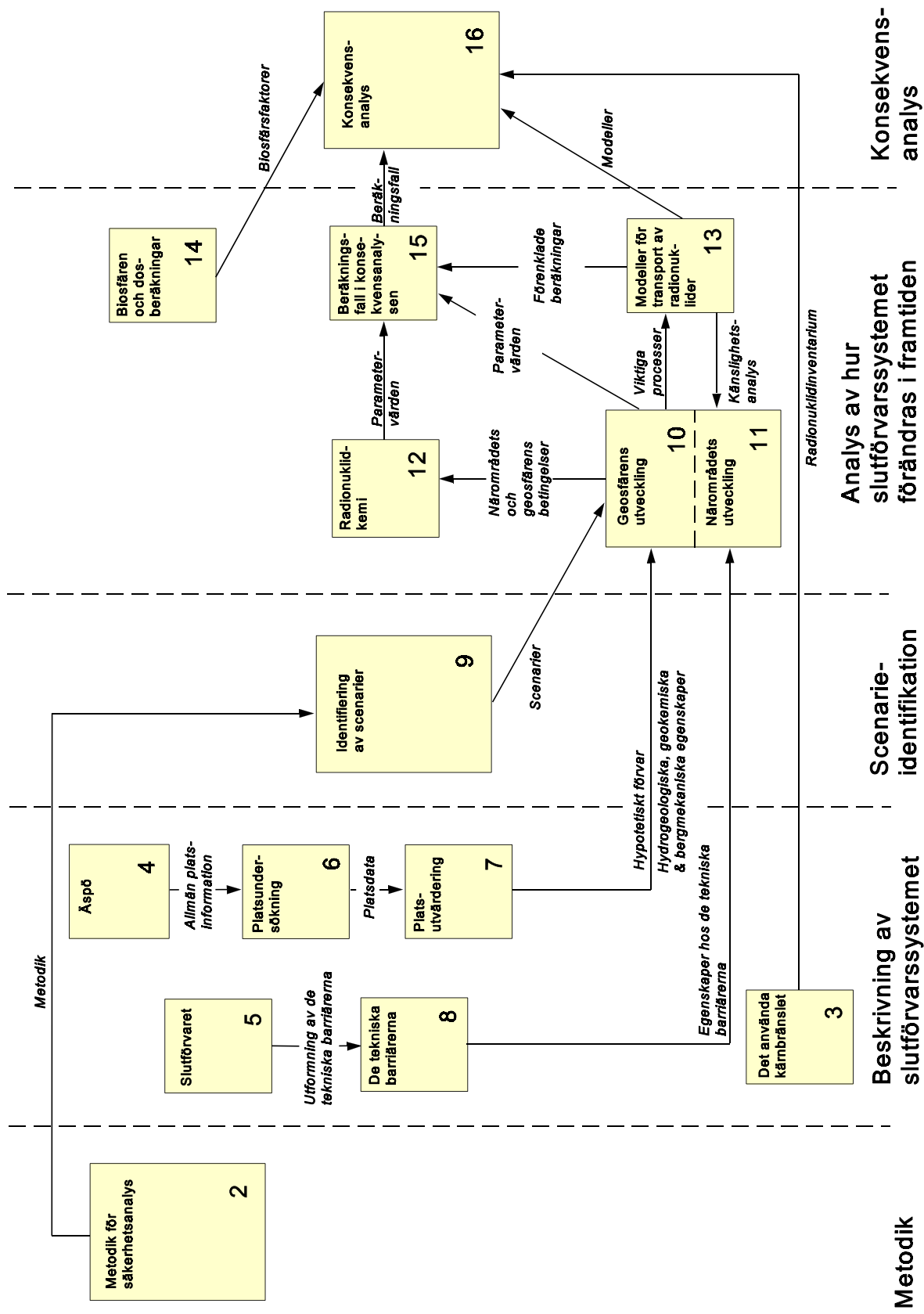
- Systembeskrivning, som beskriver processsystemet med FEPs och deras kopplingar.
- Val av scenarier, som representerar olika framtida händelseförlopp.
- Beskrivning av hur systemet utvecklas inom ramen för de valda scenarierna.
- Konsekvensanalys, som med hjälp av modeller beräknar radioaktiva utsläpp under olika förhållanden.

Figur 2.1 illustrerar hur dessa olika delar hänger ihop i SITE-94. Man bör observera att tyngdpunkten mellan de olika delarna kan variera mellan olika säkerhetsanalyser beroende på deras syfte. För en given typ av förvarssystem är de två första delarna (systembeskrivning och scenarieval) ganska oberoende av lokaliseringen av förvaret. Här nedan i avsnitt 2.2 - 2.4 och 2.6 beskrivs de olika delarna var för sig. Avsnitt 2.5 diskuterar hur olika typer av osäkerheter påverkar analysen.

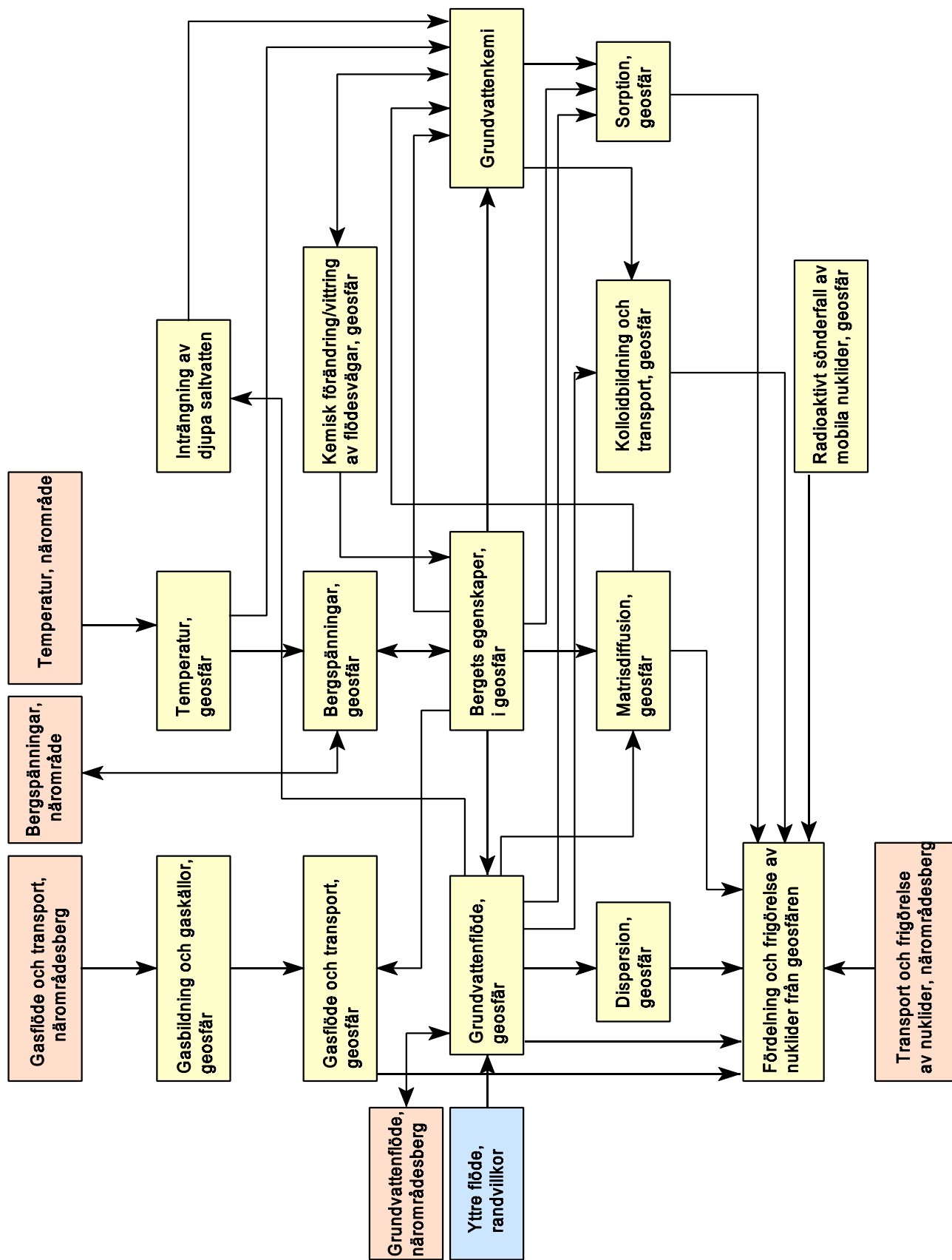
2.2 SYSTEMBESKRIVNING

Processsystemet definieras genom sina ingående FEPs. Det gäller således att först få en så komplett lista på FEPs som möjligt. SITE-94 har kunnat utgå från listor som tagits fram av ett antal internationella organisationer och organisationer i andra länder liksom listor från tidigare studier. En sammanställning gav till resultat en lista på över 1200 FEPs av vilka några, som inte var relevanta för svenska förhållanden, kunde tas bort.

En lista på FEPs räcker inte som utgångspunkt för den efterföljande modellbeskrivningen. Man måste också veta hur olika FEPs hänger samman och påverkar varandra. I SITE-94 gjordes denna del av analysen i grafisk form genom **influensdiagram**. Som framgår av figur 2.2 visas en FEP (eller grupper av FEPs) som en ruta i influensdiagrammet och påverkan från en FEP till en annan visas genom en pil. Det influensdiagram som använts i SITE-94 innehåller 161 rutor med 668 kopplingar. Figur 2.2 är således ett förenklat influensdiagram.



Figur 2.1 Samband mellan olika kapitel i SITE-94.



Figur 2.2 Förenklat influensdiagram för geosfären.

Ett slutförvar är ett komplext system med många olika typer av FEPs och kopplingar dem emellan. Det är därför nödvändigt med förenklingar. Det är inte alltid självklart vilka kopplingar som skall finnas med i en förenklad beskrivning som skall användas för modellering och konsekvensanalys. Detta blir oftast föremål för någon typ av expertbedömning.

Även om inte alla kopplingar är lika viktiga finns det ett stort värde i att först ta fram ett influensdiagram som är så fullständigt som möjligt, varefter man kan förenkla. Det finns alltid osäkerheter som gör att man har ett "fullständighetsproblem" i säkerhetsanalysen. Man måste ställa sig frågan: "Har vi har tänkt på alla möjligheter"?

Ett "fullständigt" influensdiagram ger möjlighet till kvalitetskontroll när en säkerhetsanalys är slutförd. Man kan då granska hur förenklingar gjordes och ifrågasätta om man bortsåg från några viktiga kopplingar. Influensdiagrammet är också ett medel att sätta in nya kunskaper om processsystemet i sitt sammanhang. Sådan ny kunskap kan resultera i att influensdiagrammet uppdateras, t.ex. genom nya rutor och kopplingar.

2.3 VAL AV SCENARIER

Yttre händelser ger upphov till *scenarier* för systemets utveckling genom att de påverkar FEPs i processsystemet. Influensdiagrammet är ett hjälpmedel för att analysera hur detta kan fungera. I SITE-94 förekommer 81 olika yttre händelser som kan ge scenarier, dels var och en för sig, dels i olika kombinationer. Vidare kan olika FEPs uppträda i olika ordning i tiden. Sammantaget innebär detta att man av praktiska och ekonomiska skäl inte kan analysera alla tänkbara scenarier. I SITE-94 hanteras detta problem genom att först konstruera ett referensfall och ett klimatscenario, det s.k. centralscenariet, för att sedan välja ut ett antal kombinationer av yttre händelser till några få ytterligare scenarier.

Referensfallet utgår från att processsystemet utvecklas med tiden utan yttre händelser. I referensfallet antas således att biosfären inte förändras, t.ex. genom klimatförändringar. Processer som ingår i referensfallet är t.ex. kapselkorrosion, grundvattenströmning och transport av radioaktiva ämnen. Referensfallet utgår också från att det kan finnas kapslar som är defekta och som således kan börja släppa ut radionuklider relativt tidigt. I SITE-94 har referensfallet använts för att utvärdera inverkan av osäkerheter beträffande förvarets och förvarsplatsens egenskaper.

Antagandet i referensfallet om stabila klimatförhållanden är inte realistiskt. I själva verket kan man vänta sig stora klimatförändringar under den tid säkerhetsanalysen avser. I SITE-94 ingår ett klimatscenario som innehåller sådana händelser som med stor sannolikhet kan förväntas inträffa. Med tanke på att det kan betraktas som ett mycket rimligt scenario kallas klimatscenariot för *Centralscenario*. I detta ingår ett stort antal händelser som har att göra med klimatförändringar som t.ex. permafrost, nedisning och förändringar av havsytans nivå.

Referensfallet och centralscenariet fyller två olika funktioner i SITE-94. Referensfallet värderar betydelsen av förvarets och platsens egenskaper (olika FEPs) medan central-

scenariet täcker in en stor mängd möjliga framtida utvecklingar (d.v.s. yttre FEPs). Förutom centralscenariet återstår många möjliga kombinationer av yttre händelser som kan bilda scenarier. Sådana övriga scenarier beskrivs i kapitel 9.

2.4 MODELLERING

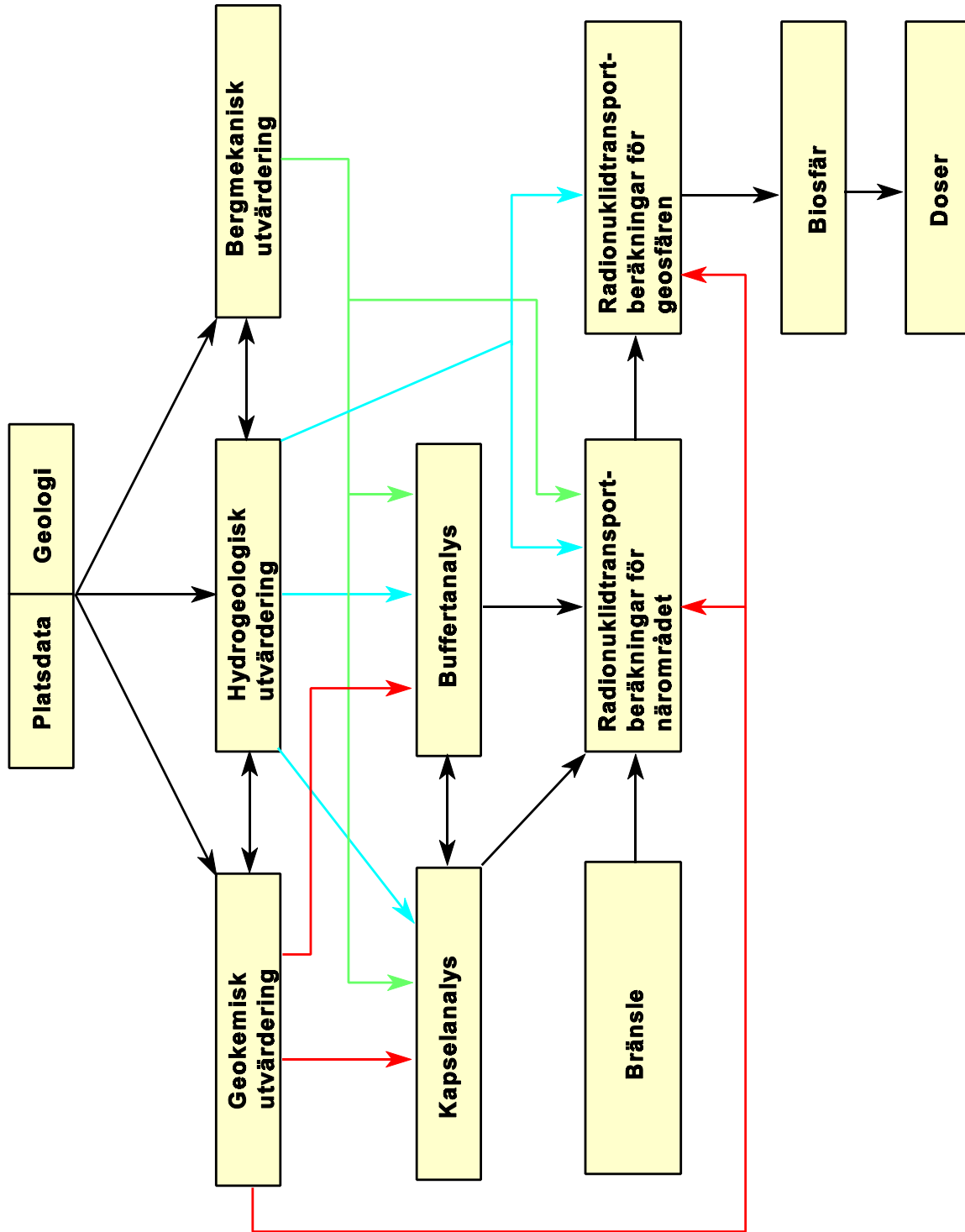
Influensdiagram visar vilka FEPs som förekommer i processystemet och hur dessa FEPs är kopplade till varandra. För att kunna beräkna hur radionuklider kan transporteras i tekniska barriärer, geosfär och biosfär måste man använda *modeller* för FEPs och deras kopplingar. Modellerna måste också kunna beskriva förvarets och platsens utveckling i tiden för valda scenarier.

I SITE-94 förekommer ett stort antal modeller som tillsammans beskriver processystemet. För att visa hur de olika modellerna passar in i analysen och hur de kopplar till varandra (resultaten från en modell ger indata till andra modeller) använder SITE-94 ett *analysschema*. Ett analysschema (se figur 2.3) visar således hur information överförs mellan olika modeller. Modeller är verktyg som på ett väldefinierat sätt, ofta genom matematiska ekvationer, omvandlar information av ett visst slag (indata) till ny information (utdata). Idealt skulle det finnas en övergripande modell för hela systemet som automatiskt överför utdata från en modell till indata till nästa modell (eller modeller) i analysschemat. I praktiken är dock detta inte genomförbart utan man har fått använda andra sätt att bearbeta information. I praktiken har expertgrupper bedömt hur informationsflödet mellan olika delar av analysen skall hanteras.

Analysschemat har fyllt flera funktioner inom SITE-94. Det visar hur processerna i influensdiagrammet i praktiken har hanterats i analysen och kan därmed också användas för kvalitetskontroll. Det utgör vidare ett värdefullt hjälpmedel för samverkan mellan olika kunskapsområden och för att identifiera behov av avstämning mellan olika delar av analysen.

2.5 OSÄKERHETER

Varje säkerhetsanalys måste utvärdera betydelsen av brist på kunskap och andra ovissheter när det gäller t ex antaganden och indata. En gemensam benämning på sådana kunskapsbrister och ovissheter är *osäkerheter*. Det är mycket viktigt att förstå att även om man analyserar osäkerheter så behöver det inte innebära att själva slutförvaret är osäkert i den meningen att det skulle läcka otillåtet mycket radioaktiva ämnen Dessutom behöver inte stora osäkerheter i indata medföra att resultatet av analysen blir osäker i motsvarande grad. Det viktiga är att man kan visa att alla viktiga osäkerheter har behandlats och att deras inverkan på beräkningsresultaten kommer fram. Givetvis måste man så långt det är möjligt minska osäkerheterna t.ex. genom att göra mer ingående undersökningar av platsen för ett djupförvar. Det är emellertid oundvikligt att det finns kvar osäkerheter även när beslut skall tas. Det gäller därför att man kan uppskatta olika osäkerheter och förstå hur de kan påverka resultaten.



Figur 2.3 Förenklat analyschema för SITE-94.

Osäkerheter introduceras i en säkerhetsanalys på olika sätt. De förekommer i systembeskrivningen och scenarievalet såväl som i modelleringen. Osäkerheterna kan indelas i fyra olika kategorier:

1. **Systemosäkerhet**, som beror på att man inte kan vara säker på att alla relevanta FEPs och kopplingar dem emellan har tagits med i analysen.
2. **Scenario-osäkerhet**, beroende på att man inte kan veta om man beaktat alla yttre händelser av betydelse, eller kombinationer av dessa.
3. **Modellosäkerhet**, som innebär att de modeller som används för utvärdering av scenarierna inte helt säkert beskriver systemet (FEPs och yttre händelser samt deras kopplingar) på ett riktigt sätt. Ett sätt att hantera modellosäkerheter är att använda olika möjliga modeller för att beskriva systemet. Om olika modeller ger olika resultat i konsekvensanalysen kan detta tyda på att modellerna inte är tillräckligt tillförlitliga för säkerhetsanalysens behov, eller att resultaten från flera modeller måste beaktas sammantaget.
4. **Parametersäkerhet**, är osäkerheter i värden på enskilda parametrar som finns i modellerna. Parametersäkerheter hanteras ofta i beräkningarna genom att täcka in dem med ett brett spann av värden. I SITE-94 görs det genom ett stort antal **beräkningsfall**.

Förutom dessa osäkerheter har många parametrar en **naturlig variabilitet**. Till exempel kan bergets genomsläpplighet för grundvatten variera mycket över ett djupförvarsområde. Man måste således skilja mellan variabilitet, som innebär att en parameters värde varierar mellan olika ställen, och parametersäkerhet, som innebär att parametern har ett visst värde som inte är helt fastställt. Det är viktigt att ha systematiska metoder för att identifiera och strukturera osäkerheter, och för att hantera dem genom säkerhetsanalysens olika led.

2.6 KONSEKVENSANALYS

I **konsekvensanalysen** genomförs beräkningar av radioaktiva ämnens frigörelse från bränslet och deras transport genom tekniska barriärer och geosfären.

De tidigare delarna i säkerhetsanalysen innebär att det för varje scenario finns ett analyschema med modeller och data. Modellerna kan vara förknippade med osäkerhet om de beskriver systemet på rätt sätt, och data med parametersäkerhet och variabilitet (se avsnitt 2.5). Den totala mängden av möjliga modeller och variationer i indata är mycket stor, särskilt som varje modell har flera ingångsparametrar som var och en kan ha osäkerheter. För att kunna hantera denna informationsmängd måste man reducera antalet möjliga variationer till ett hanterligt antal beräkningsfall. I SITE-94 har detta gjorts genom att utveckla och pröva ett formaliserat förfarande för expertbedömningar och känslighetsanalyser. SITE-94 har också begränsat konsekvensanalysen till att omfatta referensfallet och centralscenariet med de viktigaste kopplingarna mellan FEPs. I kapitel 15 redogörs för de beräkningsfall som ingått i SITE-94.

2.7 KRITERIER

När en säkerhetsanalys utgör beslutsunderlag för bedömning av ett slutförvars säkerhet behöver resultaten jämföras med i förväg uppställda kriterier. Under planering och genomförande av SITE-94 fanns det ännu inga formellt fastställda kriterier för slutförvaring i Sverige. SSI tog dock fram förslag till föreskrifter för omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall, som var föremål för remissbehandling under 1997. SKI hade vid samma tidpunkt tagit fram utgångspunkter för föreskrifter om säkerhet vid slutförvaring, som sändes på remiss samtidigt med SSIs förslag. Arbetet med föreskrifter har sedan fortsatt inom båda myndigheterna och innehållet i SSIs föreskrifter fastställdes i september 1998. SKIs föreskrifter väntas bli fastställda under 1999.

En allmän princip är att riskerna från ett slutförvar inte vid någon tidpunkt i framtiden får bli högre än den risknivå som kan godtas i dag. För individers skydd mot joniserande strålning sägs i SSIs föreskrifter att den risken från ett slutförvar inte får vara högre än 10^6 per år till personer representativa för den mest utsatta gruppen. Denna årliga risk motsvarar en årlig dos av 0.014 mSv. Som jämförelse kan nämnas att den genomsnittliga dosen till individer i Sverige är ca 4 mSv per år (varav det största bidraget kommer från radon i bostäder).

I säkerhetsanalysen beräknas doser till individer för olika scenarier och andra förutsättningar, inte minst olika osäkerheter. I de fall då den beräknade årsdosen överskrider ovan angivna 0.014 mSv måste man kunna visa att sannolikheten för att detta skall inträffa i motsvarande grad är mindre än ett per år. Exempelvis skulle ett beräkningsfall som ger 1.4 mSv per år till en representativ individ kunna accepteras, om det kan visas att sannolikheten för att det ska inträffa är mindre än 10^2 per år. I princip gäller det alltså att redovisa ett antal beräkningsfall och så långt det är möjligt uppskatta sannolikheten för dem. SKI kommer i sina föreskrifter ge utförligare anvisningar för hur detta bör ske så att en samlad bedömning kan göras.

SSIs föreskrifter ger de övergripande kraven för slutförvarssystemet i sin helhet. Dessa utgör alltså primära krav och beräknade eller uppskattade risker eller doser kan kallas primära säkerhetsindikatorer. För enskilda delar eller barriärer i slutförvaret skulle det gå att sätta underordnade eller sekundära säkerhetskrav som i princip är beroende av säkerhetsanalysen ifråga. Senast i samband med bygget av ett slutförvar måste det också finnas framtaget tekniska kriterier som kan verifieras genom experiment och mätningar. Exempel på sådana kriterier är krav på bentonitens täthet eller en minsta vägg tjocklek hos kopparkapseln.

Enligt SKIs uppfattning bör man vara restriktiv med att från myndighetssidan tidigt sätta upp eller godta detaljerade tekniska kriterier då det inte är givet att ett system av sådana skulle ge bästa möjliga skydd. I stället kräver systemets komplexitet en helhetssyn i kraven på dess funktion. Detaljerade tekniska kriterier skulle också kunna bli alltför styrande och ta ifrån SKB en del av det ansvar som reaktorägarna har enligt kärntekniklagen. Detta gäller särskilt i ett tidigt skede innan SKB bestämt sig för detaljerade lösningar. I ett senare skede kan det däremot bli aktuellt att fastställa tekniska kriterier för att säkerställa att de allmänna kraven tillgodoses vid byggande och drift av ett slutförvar.

I SITE-94 behandlas inte tekniska kriterier. Det kan dock inte uteslutas att resultaten kommer att användas för att diskutera olika möjliga tekniska kriterier, som skulle kunna utgöra villkor för tillstånd för byggande och drift av ett djupförvar.

2.8 KVALITETSSÄKRING

Säkerhetsanalysen omfattar ett stort antal aktiviteter, som var och en måste ha hög kvalitet. Det måste finnas ett system för kvalitetssäkring. Ett system för kvalitetssäkring av säkerhetsanalysen måste bl.a. uppmärksammas:

- tydlighet och logik i resonemang och antaganden,
- att inga viktiga processer lämnas utanför analysen,
- kvalitet hos modeller och data,
- spårbarhet för antaganden, modeller och data.

SITE-94 har inte tagit fram ett fullständigt system för kvalitetssäkring. Projektet har dock utvecklat verktyg som influensdiagram och analyschema som kan användas i ett sådant system. Projektet har också försökt svara upp mot ovanstående krav genom att så långt möjligt dokumentera alla steg i analysen från framtagande av data till konsekvensberäkningar, så att informationsflödet är spårbart.

3 ANVÄNT KÄRNBRÄNSLE

De tolv svenska reaktorerna ger tillsammans ca 250 ton utbränt kärnbränsle per år. Om alla kärnreaktorer ställs av år 2010 kommer det att bli mellan 7000 och 8000 ton från hela det svenska programmet. I SITE-94 har man antagit en högre utbränning än vad SKB har gjort, vilket har resulterat i en kvantitet av 6820 ton utbränt bränsle. Varje kapsel i djupförvaret beräknas rymma ca 1.6 ton uran vilket innebär att det skulle bli ca 4300 kapslar med de antaganden som gjorts i SITE-94.

3.1 BRÄNSLETS KONSTRUKTION

Bränslet till en kärnreaktor utgörs av cylindriska kulsor av urandioxid, ca 10 mm långa och med ungefär lika stor diameter, inneslutna i rör av en zirkoniumlegering (zirkaloy). Rören med bränsle, bränslestavarna, sammanhålls i bränsleelement. Härden i reaktorerna utgörs av ett stort antal bränsleelement, varav 20-25 % ersätts vid den årliga revisionsavställningen och förs till mellanlagring.

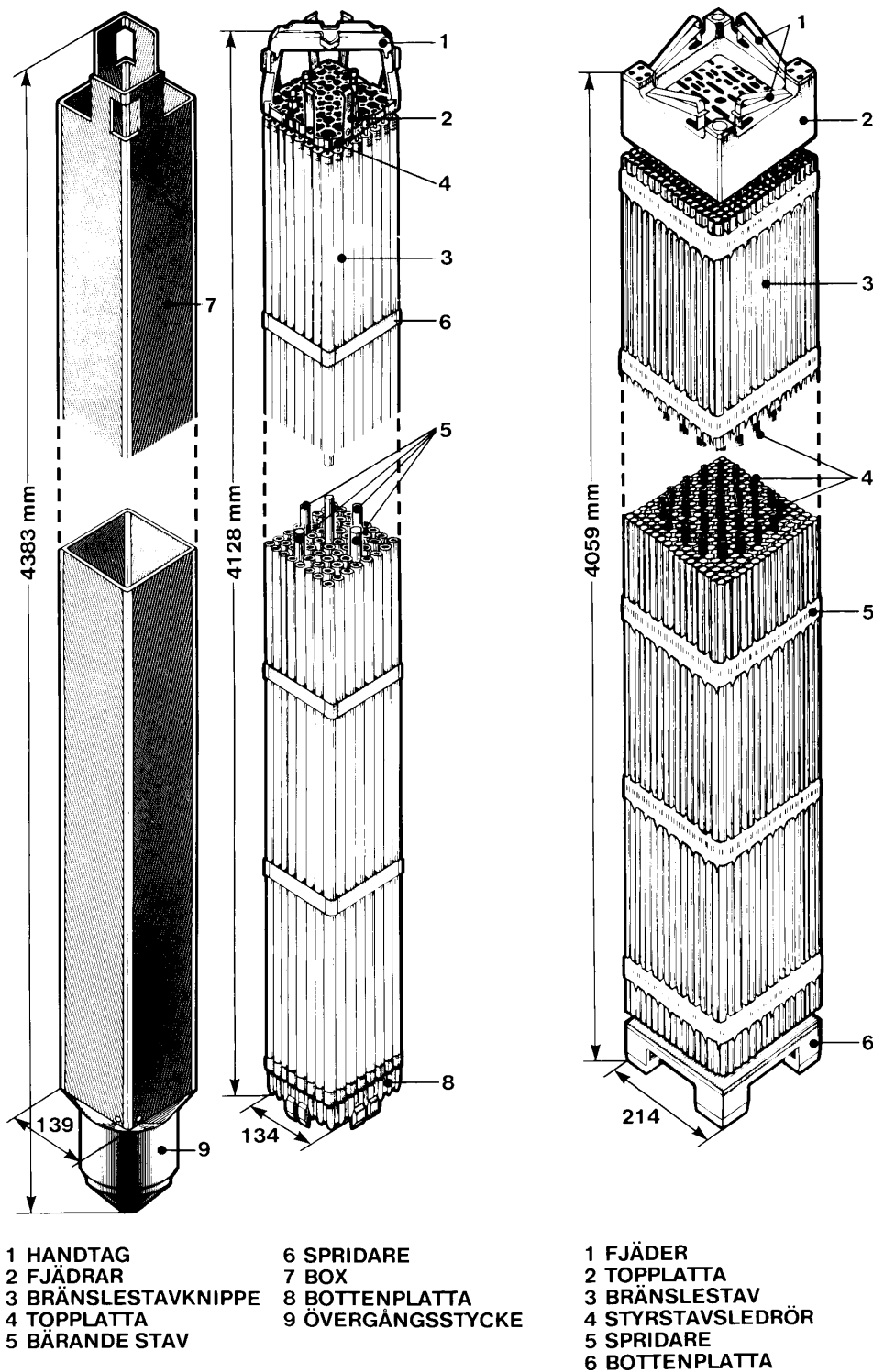
Bränsleelement har olika utformning beroende dels på reaktortyp, kokareaktor (BWR) eller tryckvattenreaktor (PWR), men också på olika modeller för samma reaktortyp. Figur 3.1 visar två exempel på bränsleelement. I det ena fallet (BWR) består elementet av ett bränsleknypp med 64 stavar i en bränslebox. Stavarna hålls i läge av en topplatta, en bottenplatta och sex s.k. spridare. Bränsleknyppet lyfts med ett handtag som sitter på topplattan. Stavknyppet omges av en box som upptill är försedd med lyftöron och som nedtill har ett övergångsstycke på vilket elementet vilar i reaktorn. PWR-elementet i figuren skiljer sig från BWR-elementet bl.a. genom att det har ett större antal bränslestavar och att det saknar box.

3.2. AKTIVITETSINNEHÅLL OCH RESTEFFEKT

Då bränslet sitter i reaktorhärden uppkommer radioaktiva ämnen genom tre olika processer:

- kärnklyvning av uran och plutonium ger fissionsprodukter, t. ex. strontium-90 och cesium-137,
- neutroninfångning i uran ger nuklider som är tyngre än uran, s.k. transuraner, t.ex. neptunium-237 och plutonium-239,
- neutroninfångning i kapslingsrör och i bränslets övriga metalldelar ger aktiveringsprodukter, t.ex. kobolt-60, nickel-59 och zirkonium-93.

Beräkningar av radionuklidinnehåll och resteffekt i kärnbränsle är en väl etablerad teknik som har hög tillförlitlighet för de flesta radionukliderna av betydelse. Det exakta innehållet i slutförvaret kommer att bero bl.a. av utbränningsgraden.



Figur 3.1 Bränsleelement från kokarreaktor (BWR) till vänster och tryckvattenreaktor (PWR) till höger. (Från rapporten, Använt kärnbränsle-KBS-3, del I, Svensk Kärnbränsleförsörjning AB/avd. KBS, Stockholm 1983).

Tabell 3.1 visar det *radionuklidinnehåll* som använts i SITE-94. Tabellen visar nuklidinnehållet en tid efter att förvaret har förslutits, närmare bestämt år 2100. Redan då har den mest kortlivade aktiviteten klingat av. Den största delen av den kvarvarande aktiviteten, som härrör från strontium-90 och cesium-137, klingar av efter ytterligare några hundra år. Därefter finns det kvar en del radionuklider med mycket långa halveringstider. Tabellen visar endast de nuklider som får betydelse för säkerhetsanalysens resultat form av doser till kritisk grupp (se figur 16.1) samt strontium-90 och cesium-137.

Även efter det att bränslet tagits ut ur reaktorn produceras värme i bränslet. Denna s.k. *resteffekt* uppstår på grund av energiproduktion vid radionuklidernas sönderfall. Man måste ta hänsyn till detta då man kapslar in bränslet, så att värmeproduktionen inte blir för hög i enstaka kapslar. Detta skulle kunna få till följd att den buffert av lera som skall omge kapslarna i djupförvaret skadas.

Tabell 3.1 Exempel på radionuklider i använt kärnbränsle som kan vara av betydelse för säkerhetsanalysens resultat.

Nuklid	Aktivitetinnehåll (Bequerel per ton uran)	Halveringstid (år)
Klyvnings- och aktiveringsprodukter		
¹⁴ C (kol-14)	1.7×10^{10}	5.73×10^3
⁹⁰ Sr (strontium-90)	3.0×10^{14}	29.1
⁹⁹ Tc (teknium-99)	6.1×10^{11}	2.13×10^5
¹²⁶ Sn (tenn-126)	1.4×10^{10}	1.00×10^5
¹²⁹ I (jod-129)	1.6×10^9	1.57×10^7
¹³⁵ Cs (cesium-135)	1.4×10^{10}	2.30×10^6
¹³⁷ Cs (cesium-137)	4.4×10^{14}	30.2
Sönderfallskedjor		
²²⁶ Ra (radium-226)	9.7×10^5	1.60×10^3
²²⁹ Th (torium-229)	1.4×10^5	7.34×10^3
²³⁰ Th (torium-230)	5.1×10^7	7.70×10^4
²³¹ Pa (protaktinium-231)	3.3×10^6	3.28×10^4
²³² Th (torium-232)	4.2×10^1	1.41×10^{10}
²³⁷ Np (neptunium-237)	2.1×10^{10}	2.14×10^6
²³⁹ Pu (plutonium-239)	1.1×10^{13}	2.41×10^4
²⁴⁰ Pu (plutonium-240)	1.7×10^{13}	6.54×10^3
²⁴¹ Am (americium-241)	1.4×10^{14}	4.30×10^2
²⁴² Pu (plutonium-242)	1.0×10^{11}	3.76×10^5
²⁴³ Am (americium-243)	1.7×10^{12}	7.38×10^3
Inducerad aktivitet i bränslekapsling		
¹⁴ C (kol-14)	7.5×10^9	5.73×10^3
³⁶ Cl (klor-36)	4.2×10^8	3.00×10^5

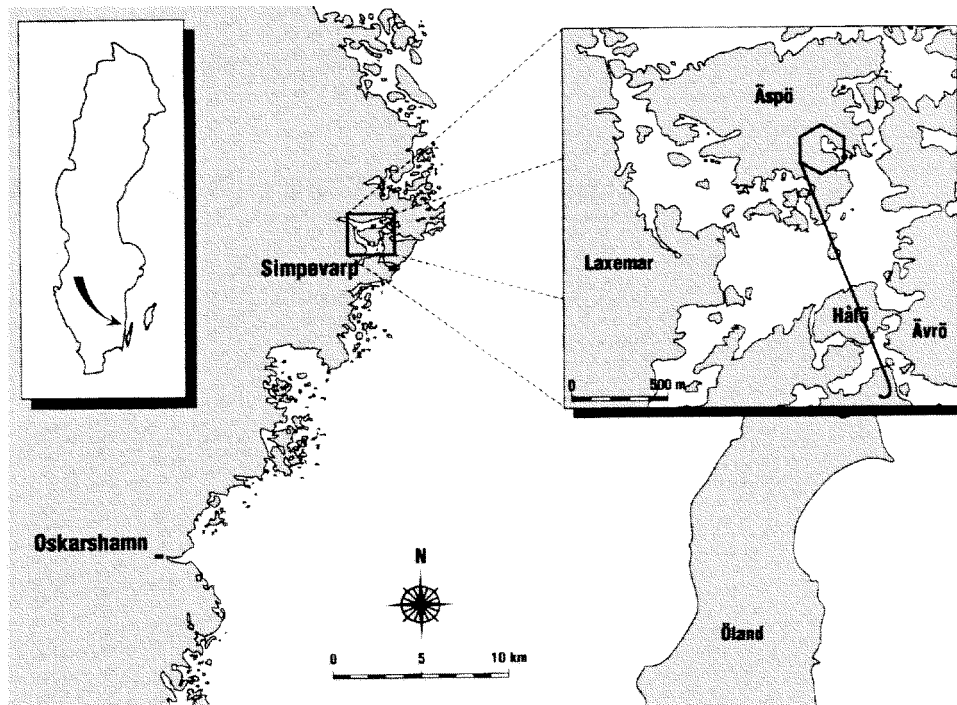
4 ÄSPÖ

SITE-94 har hämtat geologiska, hydrologiska och geokemiska data från Äspö som ligger ca 25 km nordost om Oskarshamn, se figur 4.1. Äspö ligger intill Simpevarpshalvön där Oskarshamns kärnkraftverk och det centrala lagret för använt kärnbränsle, CLAB, finns. Vid Äspö finns ett underjordiskt berglaboratorium som SKB har sprängt ut till ungefär samma djup som ett djupförvar kommer att ha enligt SKBs planer. Laboratoriet, som utgör en viktig del av SKBs forsknings- och utvecklingsprogram, kommer emellertid inte att bli platsen för ett djupförvar. Orsaken till att data från Äspö använts för SITE-94 är att området under flera år har varit föremål för omfattande undersökningar och kunskaperna om platsens egenskaper är därför goda. SKB har ställt sin databas till förfogande för SKIs projekt.

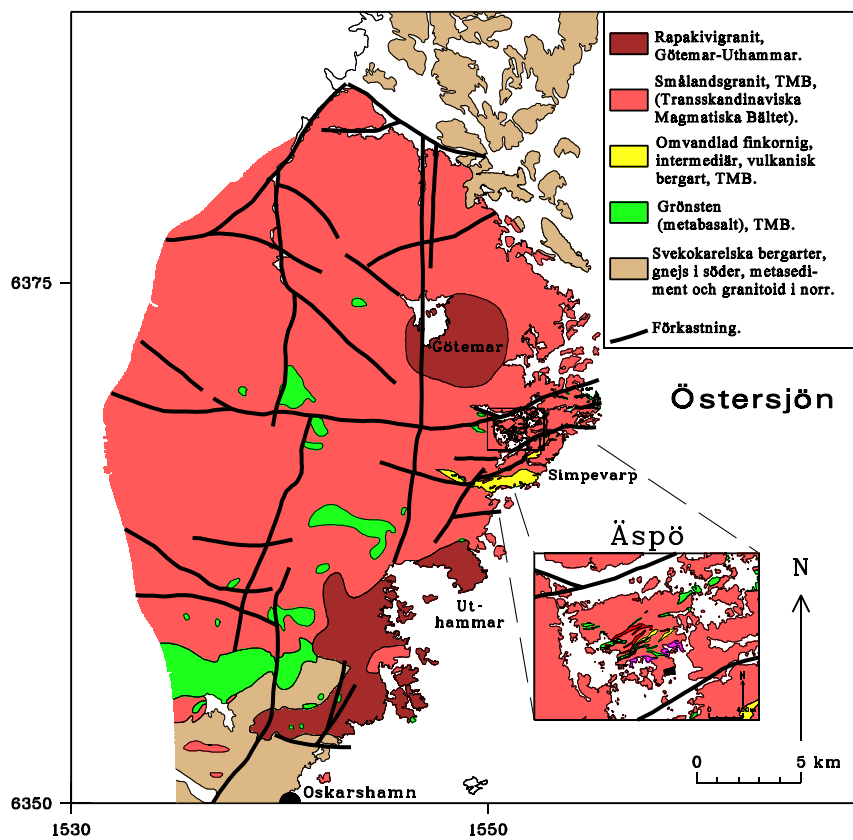
SKBs undersökningar inför byggande av Äspölaboratoriet började år 1986. Undersökningarna, som gjordes helt från ytan, omfattade bl.a. ett relativt stort antal borrhål. SKBs program på Äspö omfattar tre faser: förundersökning (1986-1990), byggnation (1990-1995) och drift (1995-). Under driftperioden utför SKB experiment och studier av grundvattenflöde och transport av radionuklider. Man utvecklar också metoder för sådana bergarbeten som kommer att utföras i ett djupförvar, prova metodik för att deponera kapslar och testa metoder för återfyllning av ett djupförvar. SKBs arbeten i Äspölaboratoriet utförs till stor del i internationellt samarbete.

Östra Småland, där Äspö ligger, domineras av granitiska bergarter. Berget täcks i första hand av morän, ibland med överliggande lager av torvmossar eller lera. Äspös högsta punkt ligger 13 meter över havsytan. Figur 4.2 ger en bild av områdets geologi. Det finns sprickor och sprickzoner av varierande storleksordning från stora regionala sprickzoner till enstaka små sprickor. Östra Småland är ett område med låg seismisk aktivitet under den tid som registreringar pågått, sedan 1904.

SKI har i SITE-94 använt data från förundersökningen då området undersöktes med ytbaserade metoder, inklusive mätningar i borrhål. Anledningen till denna begränsning är att förundersökningen har stora likheter med de platsundersökningar som enligt SKBs program kommer att ske i framtiden för val av plats för ett slutförvar, se närmare avsnitt 6.1.



Figur 4.1 Platsen för Äspölaboratoriet.



Figur 4.2 Geologisk karta över området kring Äspölaboratoriet.

5 SLUTFÖRVARET

I detta kapitel ges en översiktlig beskrivning först av hela systemet för omhändertagande av det använda kärnbränslet, därefter av djupförvarets utformning och drift. Det system och det djupförvar som beskrivs här, och som har varit utgångspunkt för SITE-94, överensstämmer inte nödvändigtvis i alla detaljer med det utförande som SKB presenterat efter år 1992 då SITE-94 startade. SITE-94 handlar dessutom enbart om en komponent i det totala systemet, d.v.s. djupförvaret för det använda bränslet.

SITE-94 bygger på antagandet att det använda kärnbränslet tas om hand och slutförvaras enligt den s.k. KBS-3 metoden, som är SKBs huvudalternativ för forskning och utveckling. Det bör åter igen framhållas att något slutligt beslut om att genomföra KBS-3 metoden ännu inte har tagits. Regeringen har uttalat att man tar slutlig ställning till metod i samband med prövning av nästa anläggning i systemet. Regeringen har också på SKIs rekommendation ställt krav på att SKB skall redovisa en analys av hela systemet, som också måste innehålla en redovisning av alternativa metoder.

5.1 ALLMÄN SYSTEMBESKRIVNING

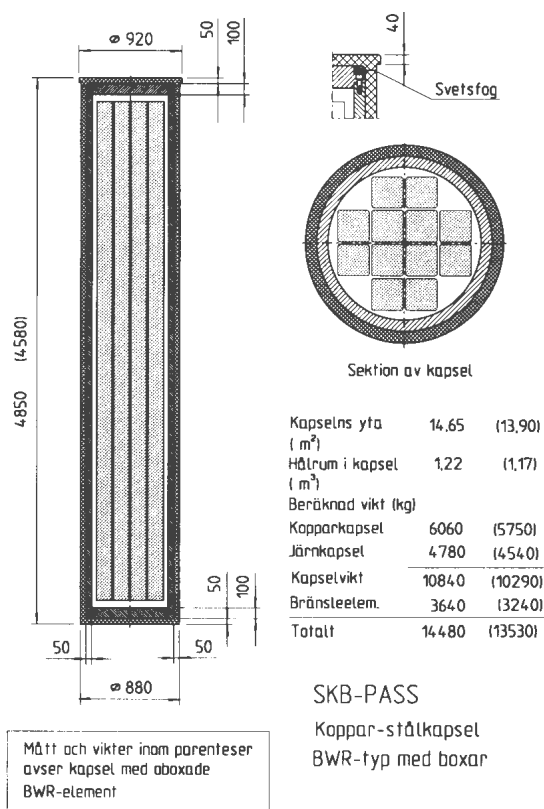
Det system som SKB har som huvudalternativ, och som är referenssystem i SITE-94, innehåller ett centralt lager för använt kärnbränsle (CLAB, vid Oskarshamns kärnkraftverk), en inkapslingsanläggning och ett djupförvar.

Efter ca ett års förvaring av det använda bränslet vid reaktorläggningarna transporteras det till CLAB. Där förvaras det i vattenbassänger ca 30 meter under markytan. Vattnet ger både kylning av bränslet och skydd mot radioaktiv strålning. CLAB kan med sitt nuvarande utförande förvara 5000 ton bränsle, vilket inte räcker för hela det svenska kärnkraftprogrammet. SKB har därför ansökt om en utbyggnad av CLAB med en andra bassäng i ett nytt bergrum till en total kapacitet på 8000 ton.

KBS-3 metoden bygger på att bränslet kapslas in i kopparkapslar, som sedan deponeras i berget. För inkapslingen behövs en särskild anläggning, som SKB planerar att bygga i direkt anslutning till CLAB. Där kapslas bränslet in i kopparkapslar med en diameter på ca 0.8 m och längd på ca 4.5 m, se figur 5.1. Kapselväggens tjocklek är 50 mm. Innanför kopparkapseln finns en behållare av stål. De båda komponenterna har skilda funktioner genom att stålbehållaren ger mekanisk stabilitet, medan kopparkapseln ger skydd mot korrosion.

En kapsel rymmer 12 BWR bränsleknippen eller 4 PWR knippen. För att inte temperaturen i någon del av förvaret skall bli för hög krävs en viss sortering av bränslet till kapslarna så att man i de enskilda kapslarna får en blandning av bränslen med olika utbränningsgrad.

I systemet ingår också transporter av bränslet från kärnkraftverken till CLAB och från CLAB/inkapslingsanläggningen till djupförvaret. Transporterna till CLAB görs med ett särskilt fartyg, SIGYN. Hur kapslarna med bränslet skall transporteras till djupförvaret



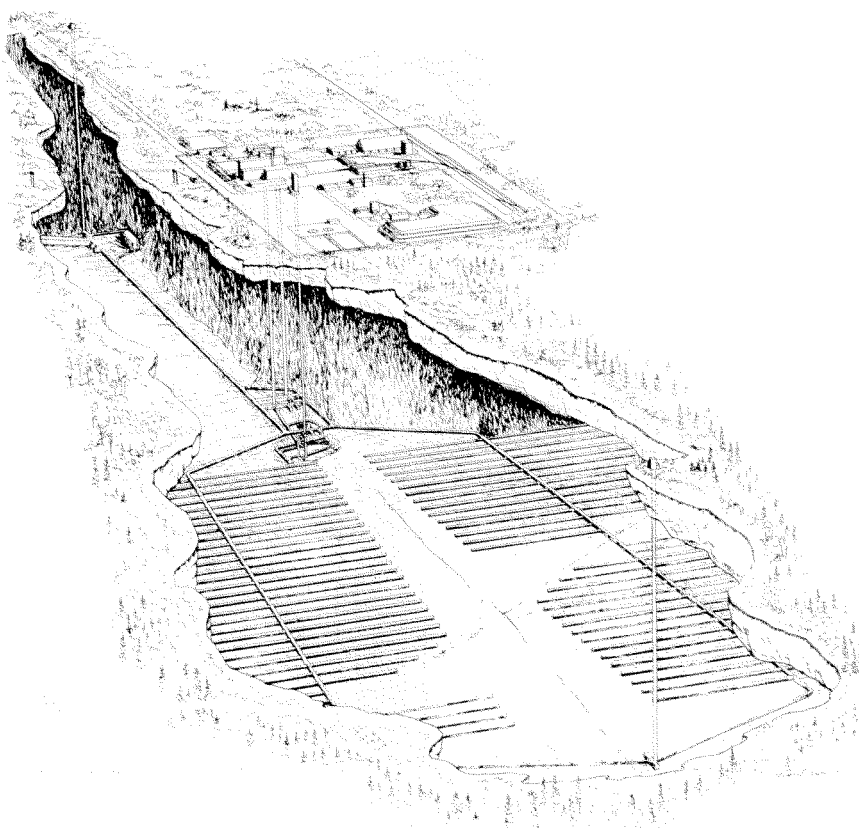
Figur 5.1 SITE-94 har använt SKBs kapsel av koppar och stål. (Från rapporten, FUD-Program 92, Kärnkraftavfallens behandling och slutförvaring, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm 1992).

beror på var det kommer att ligga. Transporter med fartyg, järnväg eller på väg är möjliga alternativ, liksom en kombination av dessa alternativ.

5.2 SLUTFÖRVARETS LAYOUT

Huvudprincipen med ett djupförvar är att kapslarna skall skyddas mot skadlig påverkan och behålla sin integritet under mycket långa tidsrymder. För detta behövs skydd mot mekaniska påfrestningar, en lämplig kemisk miljö och låg omsättning av grundvatten. Förvarets placering och design anpassas till de lokala förhållandena vad gäller t.ex. bergets stabilitet och vattenförande strukturer. I detta avsnitt anges bara huvudprinciperna för ett djupförvar. Utformningen av det hypotetiska djupförvar som använts i SITE-94 beskrivs i kapitel 7.

Figur 5.2 visar den principiella uppbyggnaden av ett djupförvar enligt KBS-3. Det består av en serie deponeringstunnlar på ca 500 m djup och med ett avstånd på ca 25 m mellan

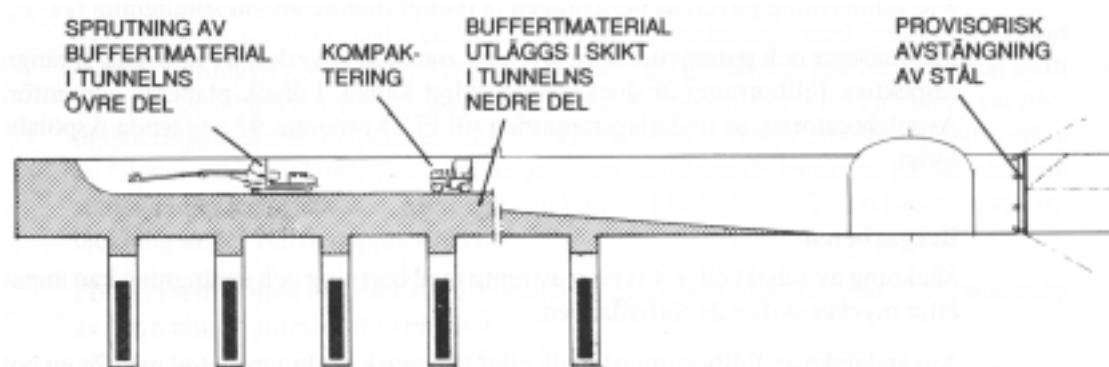


Figur 5.2 Ett djupförvar enligt KBS-3. (Från rapporten, FUD-Program 92, *Kärnkraft-avfallens behandling och slutförvaring*, Svensk Kärnbränsle-hantering AB, Stockholm 1992).

tunnlarna. Deponeringstunnlarna är förbundna med transporttunnlar. All kommunikation mellan förvaret och markytan sker i vertikala schakt.

Bränslet placeras i borrhade vertikala hål i botten av tunnlar. Avståndet mellan kapslarna anpassas så att temperaturen i bentoniten ej kan överstiga 80 °C, vilket innebär att avståndet blir minst ca 6 m. Hålen är 7.5 m djupa och 1.5 m i diameter. Kapslarna omges i deponeringshålen av ett 35 cm tjockt lager av kompakterad bentonit. Antalet deponeringshål är 4 300 med de förutsättningar som antagits i SITE-94.

Efter deponering av kapslar återfylls tunnlar med en blandning av sand och lera och med pluggar av högkompakterad bentonit placerade i lämpliga positioner. Återfyllningen fyller flera funktioner: stöd för bentoniten i deponeringshålen, skydd mot ras från tunnlaras tak, återställande av normala flödesvägar för grundvattnet och skydd mot mänsklig påverkan. Figur 5.3 visar hur arbetet med återfyllnad kan komma att gå till.



Figur 5.3 Återfyllning av djupförvaret. (Från underlagsrapport till FUD-Program 92, Kärnkraftavfallets behandling och slutförvaring, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm 1992).

6 ÄSPÖDATA

En av målsättningarna med SITE-94 har varit att öka SKIs insikter i hur plats-specifika data kan användas i säkerhetsanalysen. Med tanke på SKBs program för val av plats för ett djupförvar är det bl.a. viktigt att förstå hur säkerhetsanalysen kan användas som ett instrument i platsvalet och hur platsdata kan överföras från rena mätdata till indata i säkerhetsanalysen. Mot denna bakgrund var det viktigt för SKI att kunna använda data från en verklig plats i SITE-94 och SKI valde att använda Äspödata, som ställdes till förfogande av SKB. Inom SITE-94 har ambitionen varit att så långt möjligt göra egna utvärderingar av SKBs mätdata.

6.1 ANVÄNDA DATA

De data som använts i SITE-94 kommer från förundersökningsfasen på Äspö, då området undersöktes med ytbaserade metoder, inklusive mätningar i borrhål. Den informationsmängd som på detta sätt användes har stora likheter med den typ av information som kommer att finnas efter platsundersökningarna i SKBs program, och som skall ligga till grund för val av en plats för detaljundersökning. Man måste dock vara medveten om att Äspö-projektet är ett forskningsprojekt med andra syften och andra krav än de som kommer att ställas på kommande platsundersökningar, som skall ge data till säkerhetsanalysen. Målsättningen har påverkat hur SKB har samlat data från Äspö. Exempelvis har SKB på Äspö valt att studera egenskaper hos sprickzoner, medan ett djupförvar skall förläggas så att man undviker sprickzoner.

Förundersökningen på Äspö har syftat till att ge underlag till val av plats för laboratoriet, att beskriva de naturliga förhållandena i berget och att förutsäga förändringar av dessa förhållanden vid utsprängningen av tunnlar. Förundersökningen omfattade dels en regional översikt (i skala 25x25 km), dels geologiska, hydrogeologiska och geokemiska data från Äspö och näraliggande områden. De lokala undersökningarna omfattade dels detaljerade ytundersökningar, dels undersökningar i borrhål. Exempel på data från borrhålen är:

- mätningar på borrhärnor, avseende t.ex. avstånd mellan sprickor,
- provtagning av grundvattnets kemiska egenskaper,
- hydrauliska tester i borrhål, gällande t.ex. bergets vattengenomsläpplighet,
- radarmätningar på sprickor,
- mätningar av bergspänningar,
- spårämnesförsök mellan borrhål.

Den datamängd som finns i SKBs databas är mycket omfattande och en stor del av arbetet inom SITE-94 har varit att tolka dessa data och att överföra dem till en form som passar för säkerhetsanalysens modeller.

6.2 DATABASENS ÄNDAMÅLSENLIGHET OCH KVALITET

Betydande insatser har gjorts inom SITE-94 för att överföra mätdata till data för praktisk användning i säkerhetsanalysen. Därmed kom SKBs databas också att utsättas för analys avseende kvalitet och användbarhet. Även om detta inte var huvudsyftet med SITE-94 gav det som resultat en del slutsatser och rekommendationer inför kommande platsundersökningar. Här ges några exempel på detta:

1. En databas för en plats är mycket omfattande och ställer stora krav på dokumentation. Det gäller inte bara datamängden i sig utan också hur mätningar och provtagning genomförs, vilken utrustning som används, liksom utrustningens mätgränser och noggrannhet.
2. Det är viktigt att med god precision bestämma och dokumentera varje mätnings position. På denna punkt uppvisade databasen brister, bland annat avseende olika typer av data från borrhål.
3. Den kemiska sammansättningen av djupt grundvatten påverkas lätt av annan provtagnings- och undersökningsverksamhet i borrhålen. Detta innebär att provtagning för kemisk analys måste ske så snart som möjligt, helst direkt vid borrhålen, även om detta ställer högre krav på borrhålstekniken.
4. Grundvattenprover kan påverkas av ändringar i temperatur och tryck då de tas upp till ytan. Sådana effekter måste hållas under kontroll.
5. Mätning av grundvattenflödet i borrhål bör kunna ge mycket värdefull information för säkerhetsanalysen. Värdet av flödesmätningar för SITE-94 begränsades dock av olika problem med den utrustning som SKB använt.
6. Säkerhetsanalysen behöver också statistisk information om geologiska data, vilket ställer krav på hur mätdata insamlas och används. Databasen uppvisade svagheter i detta hänseende. En orsak är procedurerna för hur rådata har hanterats och överförts till databasen. En annan orsak är att undersökningarna fokuserats på områden med relativt stor sprickighet, vilket negativt påverkar möjligheterna till statistisk analys. Inför kommande platsundersökningar bör man tänka på detta förhållande. Givetvis finns orsak att koncentrera mätningarna på känsliga områden. Man måste då se till att detta inte sker på bekostnad av möjligheterna till statistisk analys över större områden.

Dessa exempel på slutsatser gäller endast den databas som tagits fram vid Äspö. Det bör åter igen framhållas att databasen inte togs fram för att uppfylla kraven i en säkerhetsanalys utan för andra ändamål, varför slutsatserna inte nödvändigtvis utgör kritik mot platsundersökningen.

Allmänt sett gav SITE-94 flera lärdomar av betydelse för hur man undersöker en plats, hur man bör bearbeta data så att de blir användbara i säkerhetsanalysen, och hur man bör dokumentera data så att de blir tillgängliga för framtida bruk.

7 PLATSUTVÄRDERING

Säkerhetsanalysen i SITE-94 gjordes på ett tänkt djupförvar ca 500 meter under Äspö. För att kunna beräkna grundvattenrörelser och transport av radionuklider i berget måste man ha en enhetlig bild ("modell") av platsens egenskaper. De egenskaper det gäller kan indelas i områdena geologi, hydrogeologi, geokemi och bergmekanik. I avsnitten 7.2-7.5 nedan beskrivs hur Äspödata har utnyttjats för att ta fram en sådan modell. Denna del av SITE-94 motsvarar ruta 7 i figur 2.1, d.v.s. data från platsundersökningen analyseras för att användas i utvärdering av geosfären (kapitel 10), vilket sedan ger information till beräkningar av radionuklidtransport (kapitel 13).

Det måste betonas att Äspö inte är en plats som undersökts som en möjlig plats för ett verkligt djupförvar. I själva verket visar SITE-94 att bara 380 kapslar, av totalt ca 4300, kan placeras i ett sammanhängande förvar under den del av Äspö som SKI valt för sin analys, se avsnitt 7.2.

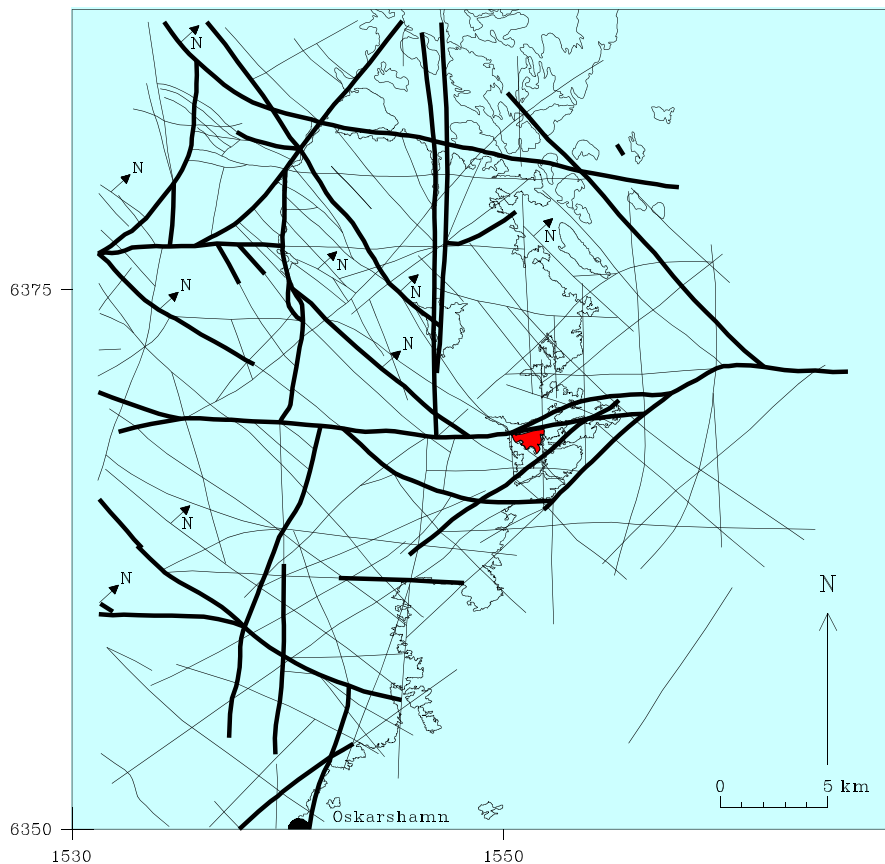
7.1 GEOLOGISK STRUKTURMODELL

En modell för den geologiska strukturen är basen för platsutvärderingen i sin helhet, genom att den ger en karta över sprickzoner i området, som kan påverka grundvattnets transportvägar och spänningar i berget. Information till den geologiska strukturmodellen har hämtats från ytundersökningar och borrhålsdata. Informationen från borrhål kommer dels från mätningar direkt på borrhärlor (t.ex. sprickfrekvens) och dels från borrhålsradar. De borrhålsdata som använts kommer från 33 borrhål varav 12 är djupa kärnborrhål och 21 är grunda hammarborrhål.

Modellen har tagits fram i olika skalor från en regional skala på 35x25 km till en lokal skala på 2x2 km. Det faktum att endast mycket begränsad information har funnits från de delar av området som täcks av vatten har gjort att modellen är mer osäker i dessa delar. Figur 7.1 visar den regionala strukturmodellen. Den visar ett mönster med större sprickzoner dels i nord-sydlig och dels i öst-västlig riktning. En del av dessa större sprickzoner har en bredd av ca 100 meter. Några är svagt sluttande, s.k. subhorisontella zoner.

Figur 7.2 visar sprickzoner i lokal skala på Äspö i två dimensioner (markytans nivå) och figur 7.3 samma modell i tre dimensioner. Modellen innehåller 52 sprickzoner varav 44 har indikerats i borrhål medan 8 zoner i modellen endast baseras på information från ytan. Av intresse för säkerhetsanalysen är inte bara spricksystemens geometri utan också de olika typer av mineral som sprickorna innehåller. Olika sorters mineral ger olika möjligheter för radionukliderna att fastna på sprickornas väggar och därmed att fördröjas då de följer med grundvattnet mot biosfären. Sprickzonerna på Äspö innehåller flera olika sorters mineral, t.ex. klorit och kalcit.

Den modell av Äspö som visas i figurerna 7.2 och 7.3 har tagits fram genom analys av information från ytundersökningar och borrhålsmätningar. Först har man sammanställt

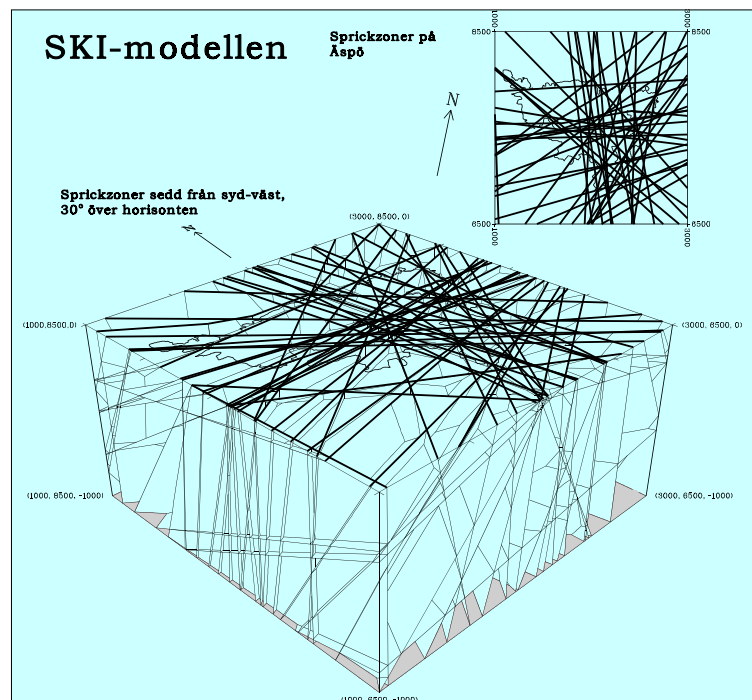
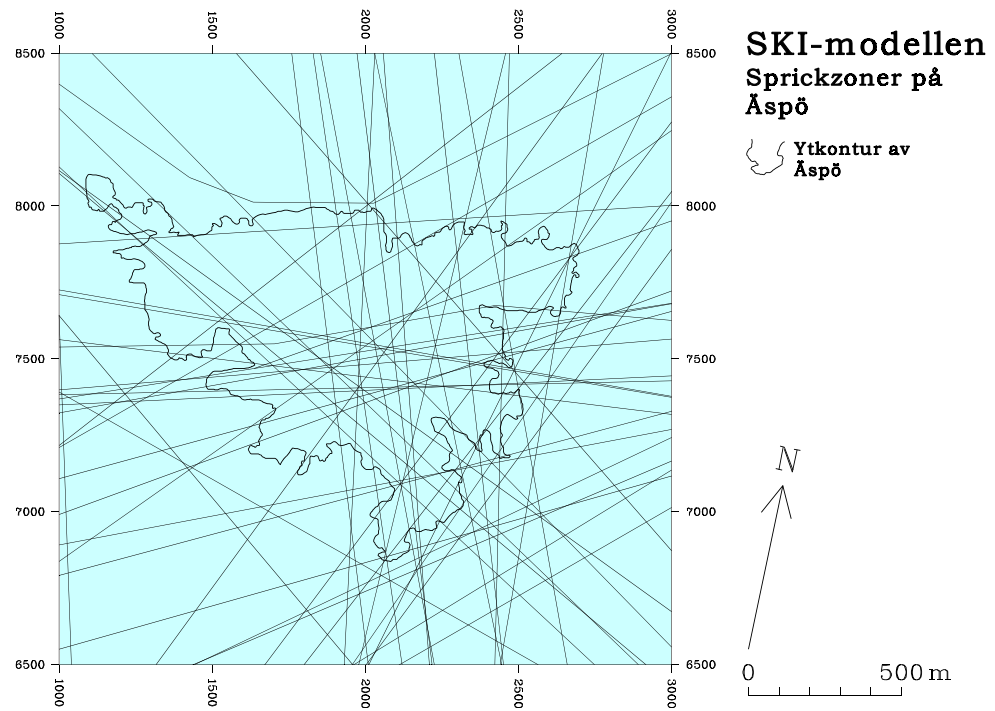


geometriska data om sprickor från bl.a. radarmätningar i borrhål till en bild av sprickornas **Figur 7.1** Sprickzoner i Äspöregionen. Större zoner visas med tjockare linje.

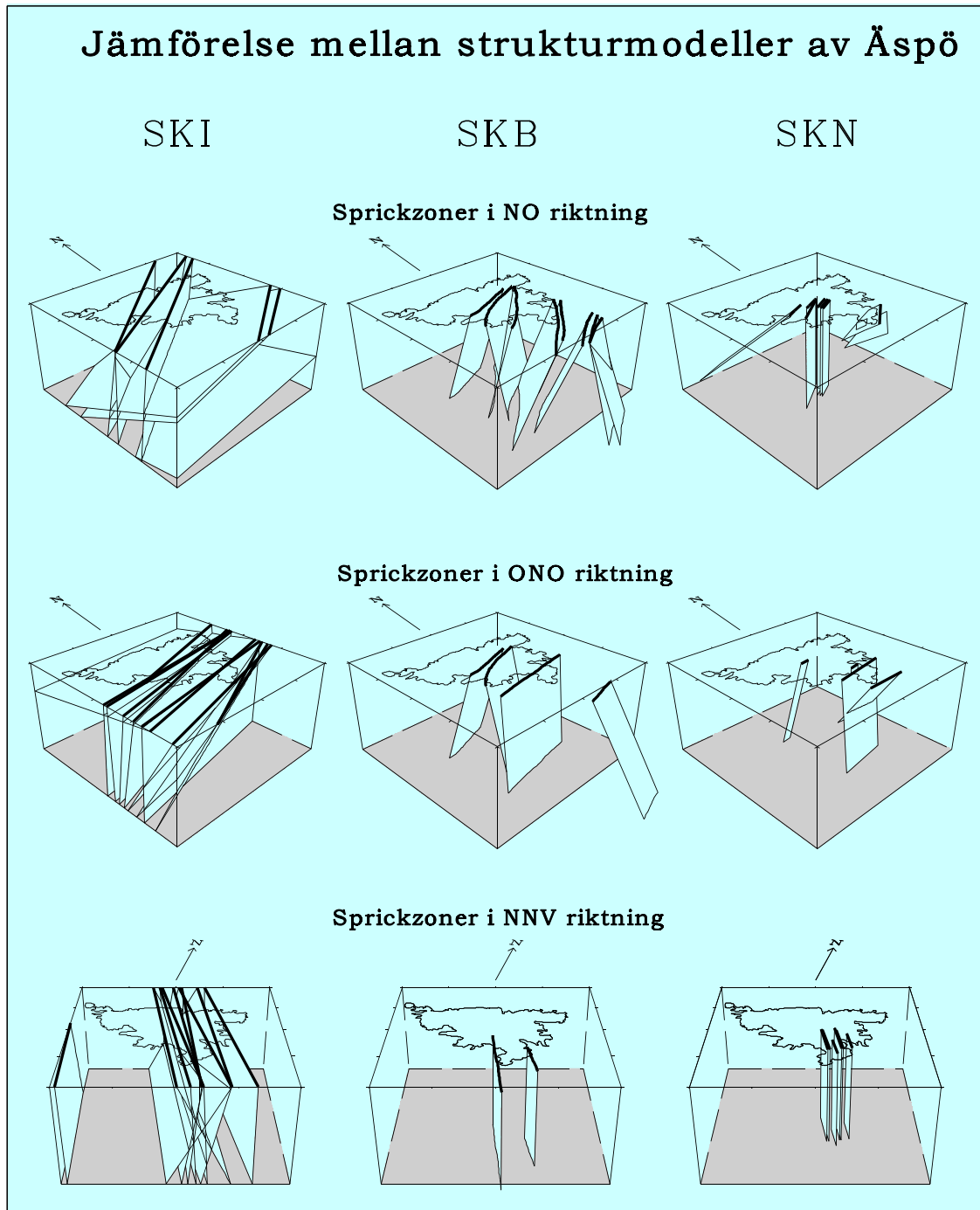
fördelning. Därefter har man sökt verifiera denna bild med annan information, t.ex. från hydrauliska tester och grundvattenprover.

Hur tillförlitlig är SKIs strukturmodell av Äspö? Uppgiften att ta fram en sammanhängande modell av området utifrån den information som finns tillgänglig från ytan och från borrhål är inte trivial. Till exempel är det ofta svårt att bestämma hur en spricka hänger ihop mellan olika borrhål. Strukturmodellen innehåller därför med nödvändighet osäkerheter. Samma dataunderlag kan tolkas på olika sätt, vilket framgår av motsvarande modeller som tagits fram av SKB och Statens kärnbränslenämnd, SKN (figur 7.4). SKBs modell innehåller 13 zoner och SKNs modell 18 zoner, att jämföras med de 52 zonerna i SKIs modell. Det finns också skillnader i zonernas bredd och utsträckning.

Det kan finnas två bidragande orsaker till skillnaderna mellan SKIs, SKBs och SKNs modeller. En möjlig orsak är olika tekniska metoder för att koppla information t.ex. mellan olika borrhål. En annan orsak kan vara att SKI, SKB och SKN har använt olika definitioner



Figur 7.2 SKI:s sprickzonsmodell för Äspö i två dimensioner.

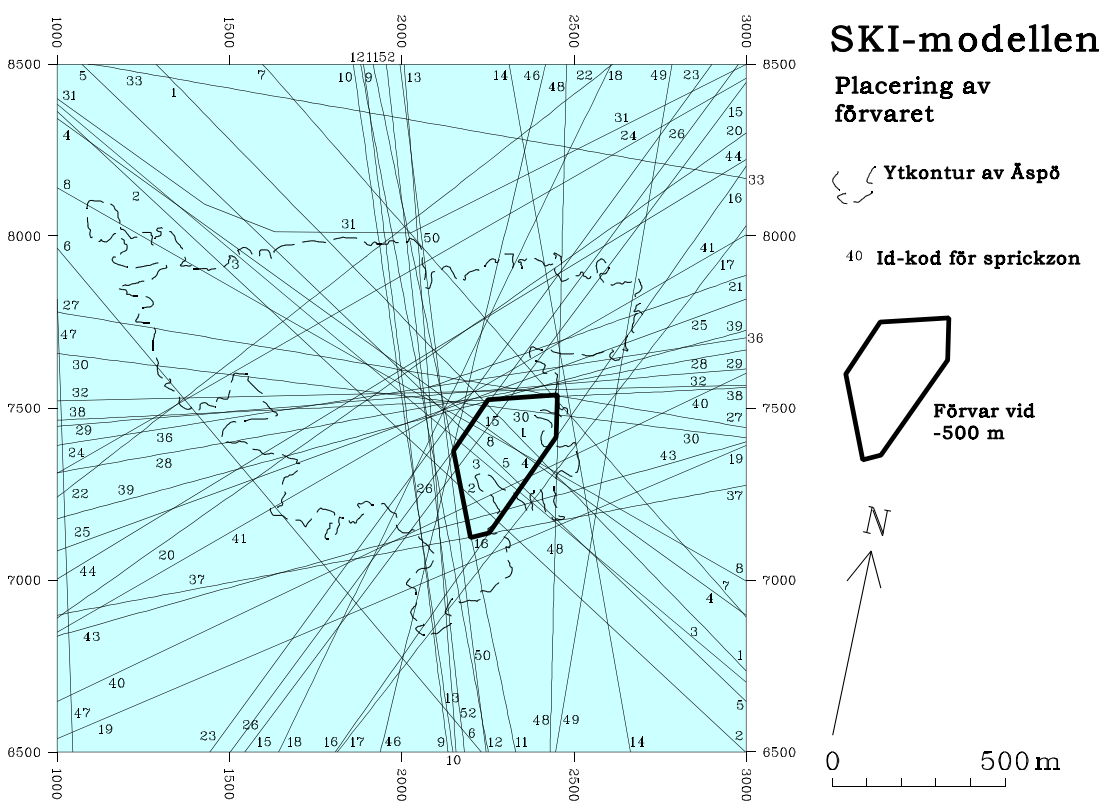


Figur 7.3 SKIs sprickzonsmodell för Äspö i tre dimensioner (samma modell som i Figur 7.2).

Figur 7.4 Jämförelse mellan SKIs, SKBs och SKNs modeller för Äspö.

för att bestämma vilka strukturer i bergmassan som skall betecknas som sprickzoner. SKIs modell har kunnat verifieras i begränsad omfattning genom att utnyttja andra data än de som använts för att ta fram modellen, och detta med relativt goda resultat. SKI planerar att efter SITE-94 utnyttja den information som nu finns i SKBs databas för att kontrollera strukturmodellens riktighet.

7.2 INPLACERING AV ETT HYPOTETISKT FÖRVAR



Den geologiska strukturmodellen har använts för att placera in ett hypotetiskt djupförvar under Äspö. För att placera ett verkligt djupförvar borde också annan information än den geologiska strukturmodellen vägas in. Genom att strukturmodellen särskilt anger större sprickzoners läge skulle den emellertid också i ett verkligt fall vara betydelsefull vid inplacering av ett förvar.

Figur 7.5 visar hur förvaret placerats in i den geologiska strukturmodellen. Utvalt område är i den del av Äspö där det finns flest borrhål och där strukturmodellen borde vara mest korrekt. Förvaret begränsas av sprickzoner och särskilt i norr och väster av större system

Figur 7.5 Inplacering av ett hypotetiskt förvar under Äspö i SKIs sprickzonsmodell.

av zoner. Tio sprickzoner passerar genom förvarsområdet. Särskilt en av dem är relativt stor (bredare än 10 meter), men sprickorna där bedöms vara förhållandevis väl ifyllta.

En fråga är hur stora sprickzoner som får skära igenom ett förvar och om det måste vara ett minsta avstånd ("respektavstånd") mellan förvaret och närmaste större sprickzon. I KBS-3 rapporten (1983) använde SKB ett respektavstånd på 100 meter. Om detta skulle tillämpas här skulle det inte finnas plats för ett förvar på Äspö. SKI har i SITE-94 inte tillämpat något sådant respektavstånd. Trots detta finns det endast plats för ca 380 kapslar i ett sammanhängande område mellan mindre sprickzoner i förvaret (vilket är mindre än 10 % av det totala antalet kapslar som behövs för allt kärnbränsle). Kapslarna får inte heller placeras för nära varandra på grund av att det använda kärnbränslet producerar värme och att temperaturen på kapselns ytteryta inte får bli för hög, vilket skulle kunna skada den omgivande bentonitleran.

I förvarets layout har SKI också tagit hänsyn till bergmekaniska förhållanden. För att undvika för höga bergspänningar (vilket skulle försvåra byggandet av förvaret) bör tunnarna placeras i bestämda riktningar i förhållande till naturliga bergspänningar och sprickzoner. Förvaret har förbindelse med ytan genom två vertikala schakt.

Erfarenheterna från SITE-94 visar att geologiska och bergmekaniska faktorer kommer att vara viktiga i SKBs program för att välja plats för ett djupförvar. Man bör bl.a. ta fram kriterier och riktlinjer för om en viss bergvolym skall kunna användas och hur man i så fall ska ta hänsyn till olika faktorer i utformningen av förvaret. Det kan t.ex. gälla hur stora sprickzoner som får finnas i och i närheten av förvaret.

7.3 HYDROGEOLOGI

Hur grundvatten strömmar vid ett djupförvar är av största betydelse för dess säkerhet. Dels påverkar grundvattnet de tekniska barriärernas egenskaper och funktion, dels sker transporten av radionuklider som eventuellt läcker ut från förvaret med grundvattnet till biosfären. Den hydrogeologiska utvärderingen syftar till att beskriva dels hur grundvattentransporten sker i dag, dels hur den kan komma att förändras i framtiden. Beskrivningen görs med hjälp av modeller som i olika skalor beskriver grundvattenflödet.

7.3.1 Några utgångspunkter

I stor skala bestämmer topografin grundvattenflödets riktning. Vattendrag, sjöar och hav är därför typiska utströmningsområden, medan högre liggande delar av landet svarar för ett nettoinflöde av vatten till berggrunden. Detta innebär att kusten vid Äspö är ett utströmningsområde för grundvatten som kommer från de inre delarna av Småland. Lokalt är dock Äspö, genom att ön höjer sig 13 meter över havet, ett inströmningsområde. Detta har dock troligen inte någon påverkan på strömningsförhållandena på förvarsdjup. Transporthastigheten för grundvatten i området kan uppskattas till ca 0.1 meter per år vilket innebär att vatten som i dag finns under Äspö på 500 meters djup kan ha funnits i berggrunden under ca 1 miljon år och ha ca 5000 års transporttid kvar innan det når ytan.

Av betydelse för grundvattenflödet är också fördelningen mellan salt och sött vatten, genom att det salta vattnet har större densitet. I inlandet återfinns salt vatten oftast först på stora djup, medan man vid kusten kan träffa på saltvatten nära markytan (under själva Äspö finns dock sötvatten). I mindre skala påverkar sprickzoner strömningsbilden, vilket gör att den strukturgeologiska modellen får stor betydelse för den lokala hydrogeologiska utvärderingen. I berget mellan sprickzonerna sker grundvattenflödet praktiskt taget utslutande i enskilda sprickor.

7.3.2 Uppläggning av den hydrogeologiska utvärderingen

Den hydrogeologiska analysen kan indelas i olika skalor, från regional skala till en skala som bestäms av avståndet mellan sprickzoner. Ju mer i detalj man vill beskriva strömningsbilden, desto större krav ställs på dataunderlaget.

Det är inte alltid möjligt att få en enhetlig bild av grundvattentransporten, vilket kan bero på begränsad tillgång till data eller på begränsad förståelse för hur vattenflödet sker i berget. I SITE-94 har sådana osäkerheter hanterats på två sätt. En metod är att genomföra överslagsberäkningar med enkla modeller. En annan metod är att använda olika konceptuella modeller, som beskriver grundvattentransporten med olika grundantaganden.

Med denna bakgrund är det naturligt att den hydrogeologiska utvärderingen har varit en komplex uppgift. Sammanfattningsvis har den omfattat följande moment:

- Utvärdering i regional skala som syftar till att ge utgångspunkter för en mer detaljerad lokal beskrivning.
- Samlad utvärdering av geologiska, hydrologiska och geokemiska förhållanden.
- Överslagsberäkningar med enkla modeller som syftar till att ge grov bild av grundvattentransporten i lokal skala, att identifiera viktiga osäkerheter och att ge en referensram för beräkningar med mer detaljerade modeller.
- Utveckling av kvantitativa detaljerade hydrogeologiska modeller med syfte att ta fram parametervärden för beräkningar av radionuklidtransport.

7.3.3 Modellerna

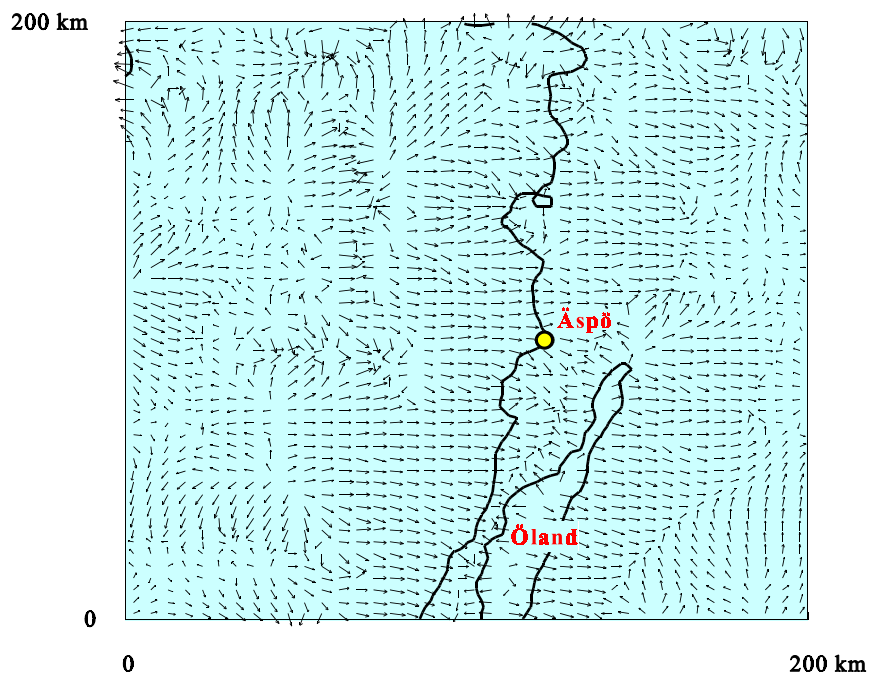
Den hydrogeologiska utvärderingen har använt olika konceptuella modeller för olika skalor allt från regional nivå till enskilda bergblock vid Äspö. Tabell 7.1 ger en sammanfattning av de modeller som använts.

De modellberäkningar som genomförts i regional skala, och som tagit hänsyn till gradienter och saltvattenfördelning, bekräftar den storskaliga flödesbild som beskrivits i avsnitt 7.3.1 med kusten som utströmningsområde för vatten som varit i berggrunden under mycket lång tid. Figur 7.6 illustrerar den regionala flödesbilden. Dessa modellberäkningar ger också randvillkor för de lokala modellberäkningarna. Den regionala flödesmodellen används

vidare för att analysera hur grundvattenströmningen påverkas av framtida klimatförändringar och istider (se avsnitt 10.3).

Tabell 7.1 Översikt över hydrogeologiska modeller i SITE-94.

Skala	Modellegenskaper	Syfte
<p>Regional</p> <p>1500 km (vertikal tvärsektion som stäcker sig från södra Norge över södra Sverige ner till norra Polen)</p>	<p>topografiska gradienter och saltvattenfördelning</p>	<p>beskriva det regionala grundvattenflödet</p> <p>ge randvillkor till platsmodellerna för Äspö</p> <p>beskriva förändringar i det regionala flödet vid klimatförändringar</p>
<p>Semiregional</p> <p>7 km (vertikalt tvärsnitt)</p>	<p>topografiska gradienter och sprickzoner</p>	<p>analys av stora sprickzoners påverkan på grundvattenflödet vid Äspö</p>
<p>Lokal (Äspö)</p> <p>från kilometerskala kring Äspö till detaljupplösning av flödet kring djupförvaret</p>	<ul style="list-style-type: none"> • enkel modell för överslagsberäkningar • 3-dimensionell diskret sprickmodell, 5×5×1 km • 3-dimensionell stokastisk kontinuum modell, 500×700×600 m 	<p>beräkna grundvattenflödets fördelning över förvarsområdet samt ge parametervärden för beräkningar av radionuklidtransporten</p>

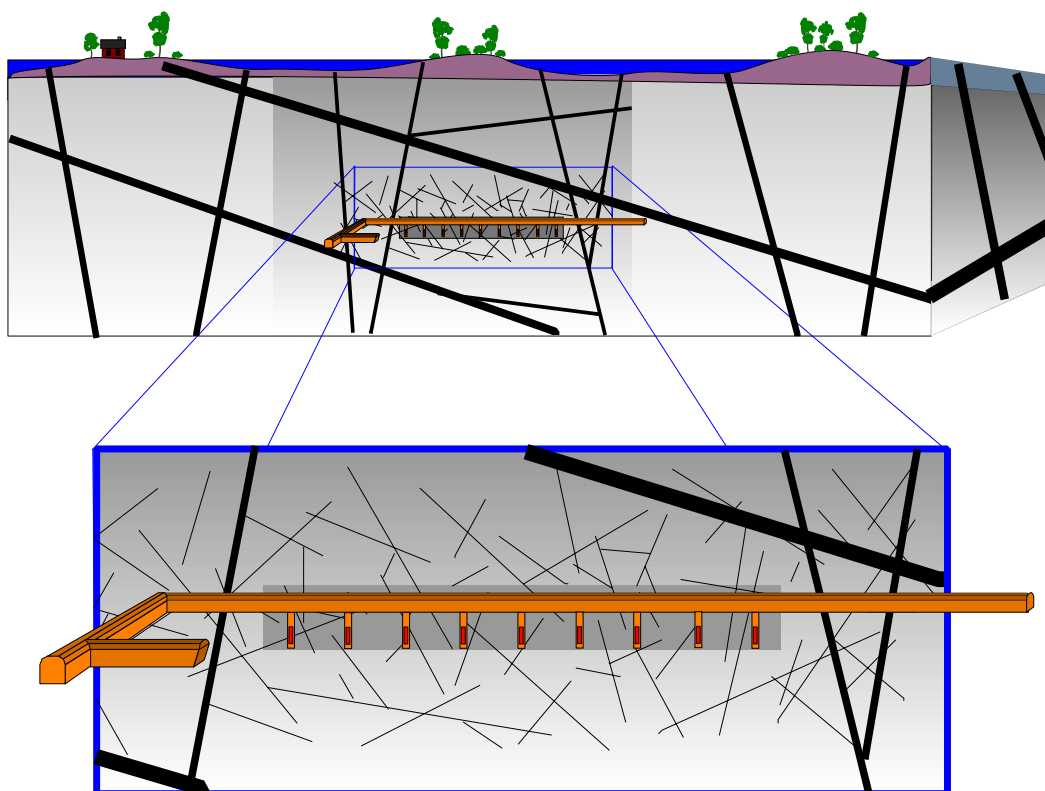


Figur 7.6 Beräknat grundvattenflöde i regional skala. Pilarna anger grundvattenflödets storlek och riktning.

Den regionala modellen tar inte direkt hänsyn till sprickzonernas påverkan på grundvattenflödet. För att få en uppfattning om vad detta kan betyda har SITE-94 använt en semiregional modell. Resultaten bekräftar i stort sett den regionala modellen, och ger en mer detaljerad bild av grundvattenflödet i Äspöområdet.

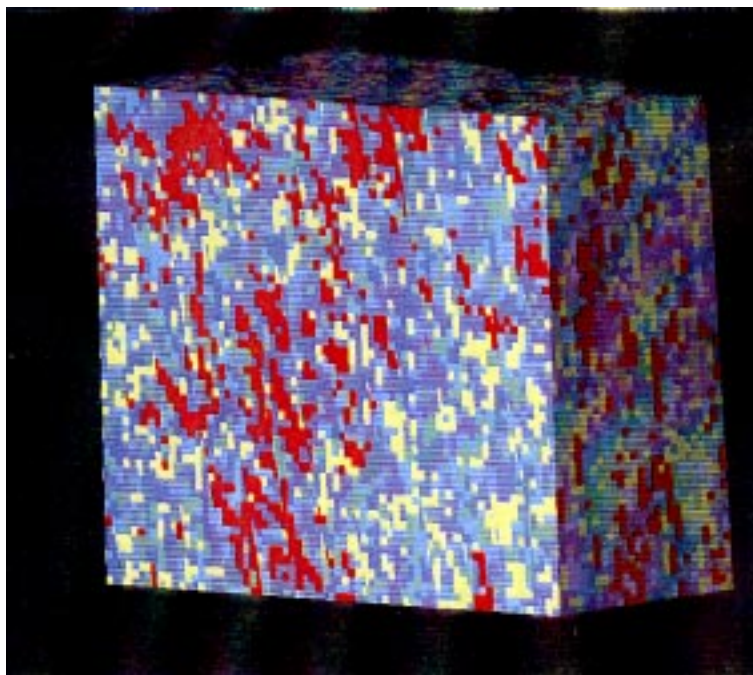
För den lokala skalan har SITE-94 använt dels en enkel modell för överslagsberäkningar, dels modeller som på ett mer detaljerat sätt tar hänsyn till bergets sprickstruktur, d.v.s. den strukturgeologiska modellen. Beräkningarna i denna skala syftar dels till att beräkna grundvattenflödets fördelning i förvarsområdet, dels till att ge parametervärden för beräkningar av radionuklidtransporten i närområdet och geosfären.

För att få en bas för hur den detaljerade modelleringen skulle utföras gjordes en utvärdering av geologiska, hydrologiska och geokemiska förhållanden vid Äspö. Utvärdering gav vid handen att den strukturgeologiska modellen (se avsnitt 7.1) inte kan förklara alla flödesvägar. Några av de flödesvägar som inte finns i den strukturgeologiska modellen kan vara sprickzoner som inte kunnat tolkas in i modellen. Andra kan vara mindre sprickzoner eller enskilda sprickor som inte kunnat identifieras i platsundersökningen. Å andra sidan finns det delar av den strukturgeologiska modellen som inte leder grundvatten.



Figur 7.7 En diskret sprickmodell för Äspö i lokal skala. I modellen finns både stora sprickzoner och små enskilda sprickor nära deponeringshål.

Det finns således grundläggande osäkerheter om hur grundvattenflödet vid Äspö skall modelleras, vilket är orsaken till valet av två olika konceptuella modeller. I den ena modellen, en **diskret sprickmodell**, sker flödet i ett system av hydrauliskt ledande enheter, som i praktiken utgörs av sprickzoner i den strukturgeologiska modellen, se figur 7.7. I den andra modellen, en **stokastisk kontinuum modell**, finns inga skarpa gränser mellan sprickzoner som leder vatten och "tätt berg". Alla delar av bergmassan är hydrauliskt ledande, men med stor variation. Figur 7.8 illustrerar hur berget representeras i den stokastiska kontinuummodellen. De olika färgerna visar hur vattengenomsläppligheten varierar mellan olika platser i berget; röd färg representerar partier med den högsta vattengenomsläppligheten och motsvarar således sprickor och sprickzoner i den diskreta sprickmodellen. Indata till denna typ av modell tas direkt från borrhålsmätningar av bergets vattengenomsläpplighet, utan mellanliggande tolkning i form av en strukturgeologisk modell.



Figur 7.8 Stokastisk kontinuummodell för Äspö i lokal skala. I denna hydrogeologiska modell representeras berget med ett stort antal block med olika vattengenomsläpplighet. Röd färg representerar områden med hög vattengenomsläpplighet.

Kring själva djupförvaret bör modelleringen göras mer detaljerad, m.a.o. ta hänsyn till enskilda sprickor snarare än bara sprickzoner. För detta finns emellertid inte tillräcklig information från platsundersökningen, vilket innebär att den strukturgeologiska modellen inte kan göras så detaljerad. Detta medför att modellen måste få ett statistiskt inslag, vilket kan göras genom att tillgängliga data från borrhål utnyttjas statistiskt. Resultatet blir att grundvattenflödet inte beskrivs i detalj, men däremot hur det kan variera inom ett bergblock.

Den mest detaljerade nivån i de hydrogeologiska beräkningarna tar hänsyn till variationer i sprickvidden hos enskilda sprickor, vilket är av stor betydelse för hur snabbt radionuklider transporteras i berget.

I detta avsnitt har vi beskrivit de hydrogeologiska modellerna, som använts inom SITE-94. I avsnitt 10.3 visar vi hur de har tillämpats för att beräkna grundvattenströmningen vid djupförvaret.

7.4 GEOKEMI

De geokemiska förhållandena är av betydelse för djupförvarets säkerhet genom att de påverkar dels de tekniska barriärernas stabilitet, dels hur radionukliderna transporteras genom berget.

7.4.1 Mineralogi och andra egenskaper hos berget

Bergmatrisen, d.v.s. berget mellan sprickor, medverkar i geokemiska processer som i sin tur påverkar grundvattnets sammansättning. I bergmatrisen kan också radionuklider hållas kvar genom matrisdiffusion (se nedan) och sorption. Mineralsammansättning och vissa fysikaliska egenskaper hos bergmatrisen är därför viktiga faktorer som måste vara väl kända för att kunna användas i säkerhetsanalysen.

Berget i Äspö består huvudsakligen (ca 75 %) av granitliknande bergarter, såsom granitoider. Dessa består i sin tur i huvudsak av mineralen plagioklas, kvarts, kaliumfältspat och biotit. Ur grundvattenkemisk synpunkt är förekomsten av järnhaltiga mineral såsom biotit och klorit särskilt betydelsefull, då detta inverkar på bergets förmåga att bibehålla en syrefri miljö. Denna såsom redox-kapacitet har utifrån det underlag som var tillgängligt för SITE-94 bedömts vara ovanligt låg, vilket också rimmar med de ovanligt låga halterna av tvåvärt (oxiderbart) järn i grundvattnet på Äspö.

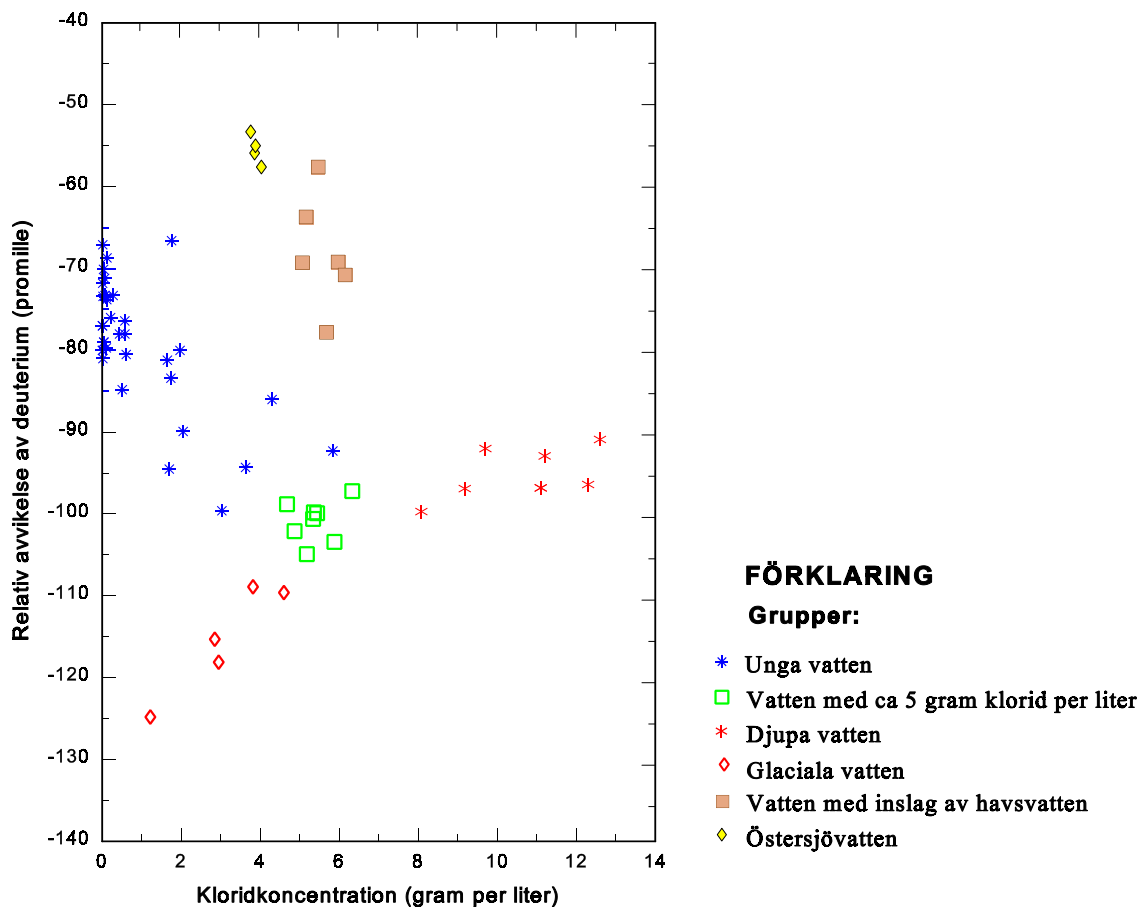
Radionuklider som frigjorts från de tekniska barriärerna transporteras med grundvattnet i bergets spricksystem. Transporten av de flesta nukliderna fördröjs dock genom att de fastnar (sorberas), mer eller mindre tillfälligt, på sprickornas ytor eller på mineral som anlagrats inuti sprickorna (sprickmineral, se nedan). En ännu effektivare fördröjningsmekanism är såsom matrisdiffusion, som innebär att nukliderna diffunderar från en spricka med grundvattenflöde in i mikrosprickorna mellan mineralkornen i bergmatrisen (se kapitel 13).

Förekomsten av sprickmineral är särskilt viktig att kartlägga i sprickor där vattnet rör sig. Sprickmineral i vattenförande sprickor är således kalcit, klorit, epidot samt oxider och hydroxider av järn. I täta eller isolerade sprickor förekommer dessutom pyrit och lermineral (illit, smektit).

7.4.2 Grundvattenkemi

Generellt sett ökar grundvattnets salthalt med djupet och det gäller också för Äspö. Typiskt är dock att salthalten kan uppvisa stora variationer också i liten skala, vilket tyder på att vattnet har väl avgränsade flödesvägar i sprickor utan kontakt med varandra. Denna tolkning stöds också av hydrologiska mätningar. Geokemiska data stöder också antagandet att Äspö i huvudsak är ett utströmningsområde för grundvatten som funnits i berget under lång tid. Koncentrationerna av främst deuterium och klorid har använts för att dela in grundvattnen vid Äspö i 5 klasser (se även figur 7.9):

1. unga vatten,
2. vatten med ca 5 g klorid per liter,
3. djupa vatten,
4. glaciala vatten,
5. vatten med inslag av havsvatten.



Figur 7.9 Diagram där data över avvikelser i halten deuterium (tungt väte) i grundvatten från olika borrhål och provtagningsdjup plottats mot kloridhalten (den senare ökar generellt med djupet). Det framgår hur de olika vattnen kan klassas i olika kategorier. Ytterligare analyser av isotopdata och jämförelser med t. ex. vatten i nederbörd, ytvatten, havsvatten och vatten från glaciärer leder till den tolkning av vattnens ursprung som framgår av markeringarna i diagrammet.

Från granskningen av grundvattendata kunde man i SITE-94 dra slutsatsen att provtagningen av vatten bör ske i ett tidigt skede av borrhålsundersökningarna. Därigenom kan man undvika att proven störs av renpumpning samt övriga provtagningar och tester.

7.4.3 Kemisk växelverkan mellan berg och grundvatten

Grundvattnen är vanligen i nära jämvikt med eller övermättade med hänsyn till järnsulfider och amorf urandioxid. Uppmätta redoxpotentialer tyder också på att järn och svavel (sulfid/sulfat) medverkar i de reaktioner som styr redoxförhållandena på djupet.

Simuleringar av grundvattnets sammansättning visar att observerade grundvattendata och mineralförekomster stämmer överens. Dessa simuleringar pekar också på att klorit och

oxihydroxider av järn är viktiga reaktiva mineral. Andra reducerande ämnen av betydelse är organiskt material (i ytnära grundvatten) och sulfidmineral såsom pyrit.

Grundvattnet på stora djup vid Äspö innehåller inget syre. Å andra sidan finns tecken på "rostbildning" i järnhaltiga mineral även till stora djup (1 000 m). Detta gäller framför allt sprickor med hög hydraulisk konduktivitet, vilket kan tyda på att syrehaltigt vatten tidigare, sannolikt i samband med en istid, har trängt ned till stora djup.

Förutom redoxförhållandena är pH, surhetsgraden, hos grundvattnet av stor betydelse. I detta fall är det förekomsten av kalkutfällningar (kalcit) som i de flesta fall är avgörande för att pH håller sig stabilt under varierande kemisk påverkan.

7.5 BERGMEKANISKA FÖRHÅLLANDEN

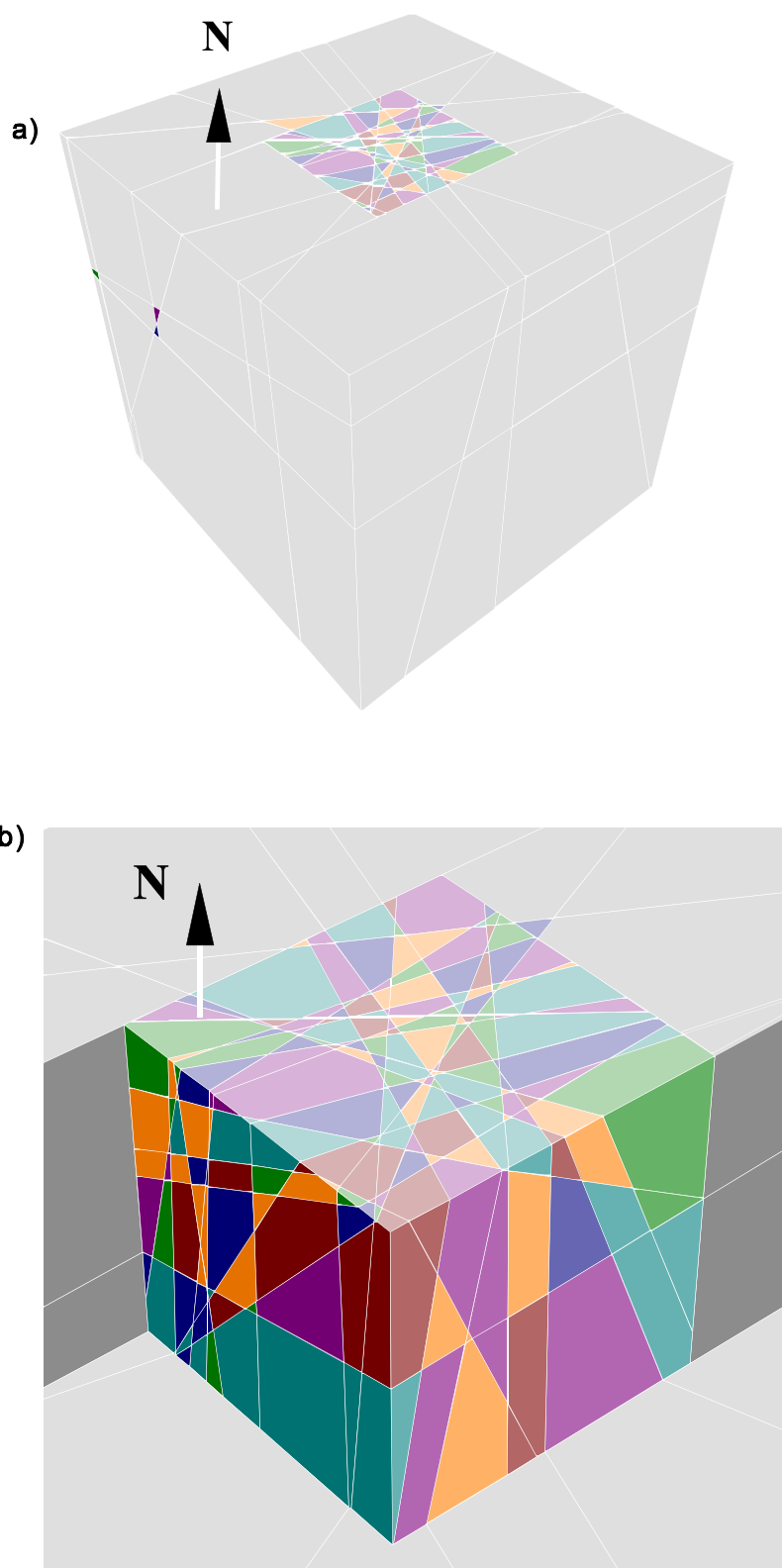
Bergmekaniska förhållanden har betydelse för ett djupförvars långsiktiga säkerhet genom att de kan påverka de tekniska barriärernas stabilitet och förutsättningarna för transport av grundvatten och radionuklider i berget. Förändringar i bergspänningarna kan t.ex. initiera nya sprickor eller få öppna sprickor att sluta sig. Detta avsnitt ger en översikt av den modellering som använts för att studera specifika frågor aktuella för de scenarier som definieras i kapitel 9. Resultaten av modelleringen presenteras i avsnitt 10.2 (geosfären) och i avsnitt 11.2 (närområdet).

Modelleringen i SITE-94 har utförts i två skalor:

- Äspö-skala (4×4×4 km).
- Tunnel-skala (25×25×18 m).

Modellen i Äspö-skala har baserats på den strukturella modellen med 52 sprickzoner (avsnitt 7.1). Beroende på begränsad datorkapacitet visade det sig emellertid svårt att inkludera alla 52 zoner i modellen, varför antalet zoner reducerades till 23. De zoner som togs bort bedöms inte kunna påverka spänningarna i nämnvärd omfattning. Denna modell har framför allt använts för att studera hur en framtida istid kan komma att påverka förvaret. Som framgår av figur 7.10 innehåller modellen en inre kub med 1.5 km sida inom vilken förvaret finns.

En annan frågeställning för den bergmekaniska modelleringen är om spänningarna vid ett deponeringshål kan initiera nya sprickor eller om befintliga sprickor förlängs. Utsprängningen av berget, trycket från bentonitleran och den förhöjda temperaturen är alla faktorer som kan ha betydelse i detta sammanhang. För att studera denna fråga användes modeller i tunnelskala. Dessa modeller använde tre olika spricksystem från den hydrologiska modellen (blockskala) för att beskriva bergmassan vid en tunnel med deponeringshål.



Figur 7.10 Modell för bergmekaniska beräkningar i a) skala $4 \times 4 \times 4$ km och b) skala $1.5 \times 1.5 \times 1.5$ km.

8 DE TEKNISKA BARRIÄRERNA

Som framgår av kapitel 5 består de tekniska barriärerna i djupförvaret av kopparkapseln, bentonitleran samt tunnlar och schakt med återfyllnad. I detta kapitel beskriver vi några faktorer som kan påverka barriärernas egenskaper. Avsnitt 8.1 behandlar kapseln och avsnitt 8.2 buffert och återfyllnad.

8.1 KAPSELN

Den kapsel som analyserats i SITE-94, och som är SKBs huvudalternativ, består av två komponenter, en yttre kopparkapsel och en inre stålbehållare. Kopparkapseln skall ge skydd mot påverkan, framför allt mot korrosion, medan stålbehållaren skall ge mekanisk stabilitet. Det måste framhållas att kapselkonstruktionen ännu är under utveckling och att särskilda krav ställs på kapseln jämfört med vanlig industriproduktion. Framför allt måste den behålla sin integritet under extremt långa tider. Eftersom den inte kommer att kunna provas för så långa tider måste man ställa mycket höga krav på förståelsen för de mekanismer som skulle kunna påverka integriteten.

8.1.1 Tillverkning och provning

Kapseln måste också fylla viktiga funktioner innan den placeras i ett djupförvar, t.ex. måste den kunna motstå påverkan vid transportolyckor så att radioaktivitet inte släpps ut. Kortfattat måste kapseln uppfylla höga funktionskrav beträffande:

1. motstånd mot korrosion i djupförvaret,
2. motstånd mot mekanisk påverkan såväl före som efter placering i djupförvaret,
3. skydd mot strålning,
4. ha lämplig geometri med avseende på risken för kriticitet.

Dessa krav på funktion kan överföras till krav på tillverkningsprocessen med efterföljande kontroll. Den mest kritiska delen i tillverkning och hantering av kapseln blir sannolikt att svetsa fast locket efter det att kapseln fyllts med använt kärnbränsle. Den teknik som SKB planerar för detta är *elektronstrålesvetsning*. Att göra detta på en kopparkapsel med 5 cm tjocklek är inte en välkänd teknik, utan är föremål för ett omfattande utvecklingsprogram. Bland de frågor som måste undersökas är om kopparns kornstorlek förändras i svetsen (vilket skulle kunna påverka de mekaniska egenskaperna) och om processen kan tillföra föroreningar i svetsfogen. Tillverknings-processen måste också utformas så att man inte bygger in sådana spänningar i kapseln att dess mekaniska egenskaper försämras, t.ex. genom s.k. krypning.

När kapseln förslutits skall den undersökas med oförstörande provning för vilket två metoder övervägs: *ultraljudsprovning* och *radiografi*. Också för dessa moment planeras ett omfattande utvecklingsprogram, bl.a. vid ett kapsellaboratorium i Oskarshamn.

8.1.2 Korrosion

Man kan skilja mellan två typer av korrosion: allmätkorrosion och lokal korrosion. Med **allmätkorrosion** menar man korrosion som samtidigt verkar på kapselns hela yta. I ett KBS-3 liknande förvar begränsas den av vilka mängder korrosiva ämnen som finns i grundvattnet, samt den tid det kan ta för dem att komma in till kapseln genom bentonitbufferten. Den livslängd som kan beräknas för kapseln med avseende på allmätkorrosion i den kemiska miljö som förväntas i djupförvaret (syrefria förhållanden) är mycket lång (i storleksordningen miljoner år).

I förhållande till allmätkorrosion är **lokal korrosion** begränsad till en liten del av kapseln men den kan å andra sidan under specifika förhållanden snabbare tränga igenom hela kapselväggen. Det finns olika mekanismer för lokal korrosion, som kan förorsakas av yttre faktorer (t.ex. ojämn tillförsel av korrosiva ämnen) eller inre processer och egenskaper (t.ex. defekter i kapselmaterialet eller i svetsen).

Insatserna i SITE-94 har begränsats till sådana processer för allmätkorrosion och lokal korrosion som kan förväntas uppkomma i förvaret. Andra tänkbara typer av korrosion, som dock inte behandlats i SITE-94, är t.ex. spänningskorrosion, korrosion förorsakad av mikrober och korrosion av den inre stålbehållaren under vätgasutveckling.

8.2 BUFFERT OCH ÅTERFYLLNAD

Kopparkapseln omges i deponeringshålen av en buffert med högkompakterad bentonitlera. **Bufferten** skall fylla följande funktioner:

1. Ge kapseln mekaniskt skydd.
2. Skydda kapsel och utbränt kärnbränsle (om kapseln penetreras) mot kemisk påverkan.
3. Hindra grundvattenströmning vid kapseln. Detta åstadkoms genom att leran kan svälla och har mycket låg vattengenomsläpplighet. Grundvattnet (och därmed i vattnet lösta korrosiva ämnen) kan bara nå kapselytan genom diffusion.
4. Fördröja eventuellt frigjorda radionuklidens transport till vattenförande sprickor i berget. Nukliderna transporteras ut genom bufferten med diffusion. Dessutom fördröjs de genom sorption på mineralytor i leran.

När förvaret överges skall tunnlar och schakt **återfyllas** med en blandning av bentonit och sand. På strategiska ställen placeras bentonitspärrar för att förhindra att tunnelsystemet blir mer hydrauliskt ledande än sprickorna i berget. Gränsen mellan högkompakterad bentonit i deponeringshålen och annat material i tunnarna kräver särskild uppmärksamhet så att bentoniten inte genom svällning expanderar upp i tunnarna, vilket skulle försvaga bentonitbarriären.

Utsprängningen av förvaret måste genomföras så att man inte åstadkommer negativa effekter för den långsiktiga säkerheten. Detta gäller t.ex. de förstärkningsarbeten som görs för att undvika berggras mm. Utöver detta sprutar man in cement i vattenförande svaghetszoner för att begränsa vattenflödet, vilket kan påverka grundvattnets kemiska egenskaper. En annan effekt är att utsprängningen av tunnarna åstadkommer en s.k. störd zon med andra spänningsförhållanden än det ostörda berget. Genom att bergspänningar påverkar sprickors förmåga att leda grundvatten finns det en risk för att nya transportvägar för radionuklider kan uppkomma.

Beträffande ovan nämnda frågor om buffertens funktion samt förvarets utsprängning och återfyllnad begränsades insatsen inom SITE-94 till att illustrera bentonitens genomsläpplighet för radionuklider.

9 IDENTIFIERING AV SCENARIER

I kapitel 2 infördes begreppet *processystem* för egenskaper, händelser och processer som finns inbyggda i slutförvarssystemet. Dessa har nu beskrivits i kapitlen 3 till 8. Sådana händelser som ligger utanför processystemet kallas *yttre händelser* och ger upphov till *scenarier* för systemets framtida utveckling. I detta kapitel beskrivs hur SITE-94 har definierat scenarier för det fortsatta analysarbetet (konsekvensanalysen). Det måste betonas att scenarieanalysen inte skall ses som förutsägelser om framtiden. Scenarierna skall mer betraktas som illustrationer av möjliga förlopp som kan påverka framtida utsläpp av radionuklider från ett djupförvar.

9.1 METODIKEN

En genomgång av internationella listor över FEPs och yttre händelser resulterade i att 81 yttre händelser identifierades som skulle kunna påverka processystemet i SITE-94. För att få ett hanterbart antal scenarier valdes sedan följande strategi för scenariearbetet:

- Ett *referensfall* definierades, som utgår från att processystemet utvecklas med tiden utan yttre händelser, m.a.o. förhållanden utanför djupförvaret hålls konstanta. I referensfallet ingår möjligheten att det kan finnas kapslar som är defekta och som således kan börja släppa ut radionuklider i ett tidigt skede.
- Ett *centralscenario* konstruerades som innehåller en tänkbar sekvens av klimatvariationer under mycket lång tid framåt. Det innehåller därmed en stor mängd av de klimatrelaterade yttre händelser som finns på listan av 81 händelser.
- Från den återstående delen av listan av yttre händelser konstruerades ett antal *övriga scenarier*. I motsats till centralscenariet behandlades dessa inte i konsekvensanalysen i SITE-94.

Referensfallet, centralscenariot och övriga scenarier beskrivs här nedan i avsnitt 9.2-9.4.

9.2 REFERENSFALLET

Avsikten med referensfallet är att analysera hur förvarssystemet utvecklas utan yttre påverkan från t.ex. klimatvariationer eller mänsklig aktivitet. Processer som ingår i referensfallet är t.ex. kapselkorrosion, grundvattenströmning och transport av radioaktiva ämnen. Skillnader i resultat från konsekvensanalysen mellan referensfallet och centralscenariot ger information om hur känsligt systemet är för yttre påverkan. I SITE-94 har referensfallet också använts för att utvärdera betydelsen av osäkerheter i förvarets och förvarsplatsens egenskaper.

9.3 CENTRALSCENARIOT

För att analysera centralscenariot behöver man fastställa en *tänkbar klimatudveckling*, förändringar av miljön i förvarsområdet och hur dessa förändringar påverkar förvarssystemet. För att fastställa klimatvariationerna har SITE-94 utgått från resultat från beräkningar med stora klimatmodeller. I dessa modeller styrs de storskaliga klimatförändringarna av bl. a. cykliska variationer av jordaxelns lutning i förhållande till jordens bana runt solen.

Mänsklig inverkan på klimatet, t.ex. genom växthuseffekten, ingår inte i centralscenariot, dels beroende på svårigheter att förutsäga denna typ av process, dels beroende på att dess betydelse bedöms relativt begränsad i centralsceniots sammanhang (t.ex. bedöms växthuseffekten möjligen kunna försena nästa istid, men inte förhindra den).

Centralsceniots omfattning har begränsats till de närmaste 100 000 åren. Under denna tidsrymd förväntas ett antal nedisningar av varierade omfattning. I korthet kan centralscenariot indelas i sju tidsperioder med följande tänkbara förhållanden (som dock inte får uppfattas som en prognos för den framtida klimatudvecklingen):

0-10 000 år. Klimatet i Sverige förändras gradvis mot kallare förhållanden. Den skandinaviska fjällkedjan täcks med ett istäcke och i norra delen av Sverige utvecklas tidvis permafrost, dock inte söder om Stockholm. Havsytan sjunker 20 till 40 meter.

10 000 - 30 000 år. Efter en kortare period av varmare klimat kommer en större nedisning om ca 20 000 år. Den når Stockholmsområdet, men sannolikt inte Äspö. Istäcket i Stockholmsområdet kan bli 800 meter och vid Äspö råder permafrost. Havsytan vid Äspö sjunker till ca 50 meter under nuvarande nivå.

30 000 - 50 000 år. Klimatet i Sverige blir torrt och kallt med permafrost i de norra delarna av landet.

50 000 - 70 000 år. Under denna period inträffar en stor nedisning som kulminerar vid 60 000 år. Hela landet täcks av is som i de centrala delarna kan bli 3 000 meter tjock. Vid Stockholmsområdet kan istäcket komma att bestå under 10 000 år. När isen smälter och isfronten är i Stockholmsområdet, kommer havsytan vid Äspö att vara ca 80 meter över dagens nivå.

70 000 - 80 000 år. En förhållandevis varm period inträffar med ett klimat i Stockholmsområdet liknande det som vi i dag har i norra Sverige. I södra Sverige kan jordbruk i dagens former förekomma. Havsytans nivå är ungefär som i dag.

80 000 - 120 000 år. En ny stor istid inträffar som kulminerar vid ca 100 000 år med ett istäcke vid Äspö på ca 1 000 meter.

120 000 - 130 000 år. Nästa varma period med ett klimat som liknar dagens förhållanden.

I jämförelse med referensfallet påverkar centralscenariot modellering och konsekvensanalys inom följande områden:

- Den bergmekaniska modelleringen måste omfatta belastningen från ett istäcke.
- Förändringar i havsytans nivå, permafrost och isbeläggningen påverkar grundvattenflödet.
- De geokemiska förhållandena påverkas. Ett exempel är fördelningen mellan salt och sött vatten, ett annat att syrehaltigt vatten kan tränga ner till förvarsdjup.
- Dessa effekter påverkar frigörelse och transport av radionuklider.

Metodiken för att ta om hand dessa effekter har beskrivits i kapitel 2. Först justeras influensdiagrammet (figur 2.2) så att det representerar de processer som gäller för centralscenariot. Sedan modifieras analys-schemat (figur 2.3) så att modelleringen beskriver processerna och deras kopplingar. I förhållande till referensfallet innebär detta att komplexiteten ökar genom fler kopplingar mellan processer. Detta gäller i första hand för geosfärmodelleringen medan närområdesmodelleringen är i stort sett densamma för centralscenariot som för referensfallet. Hur centralscenariot i praktiken påverkar modelleringen framgår av kapitel 10-16.

9.4 ÖVRIGA SCENARIER

Även om centralscenariot behandlar en stor del av de 81 yttre händelser som finns på listan återstår ett antal obehandlade. En uppgift för den fortsatta analysen i SITE-94 var således att gruppera dessa till ett antal ytterligare scenarier. Först sorterades ett antal händelser bort efter tre kriterier:

1. Avvikelse från djupförvarets specifikation beroende på t.ex. bristande kvalitetskontroll av de tekniska barriärerna inkluderades inte.
2. Mänskligt intrång behandlades inte, medan annat mänsklig påverkan ingår.
3. Sådana yttre händelser vars effekter uppenbart kan negligeras i förhållande till andra händelser inkluderades inte.

Återstående yttre händelser kunde sedan grupperas till en lista på åtta scenarier, som redovisas i tabell 9.1. I SITE-94 görs ingen ytterligare analys av dessa scenarier. I några fall kan man bedöma att effekterna av dem kan inkluderas inom ramen för de variationer som gjorts för referensfallet och inom ramen för centralscenariot. Detta gäller emellertid inte alla "Övriga scenarier" varför det återstår för kommande säkerhetsanalys att behandla dem.

Tabell 9.1 Lista på övriga scenarier i SITE-94, men som inte analyserats med konsekvensberäkningar inom SITE-94.

Nr	Scenario
1	Ett alternativt klimatscenario (varmare och fuktigare än centralscenariot)
2	Storskalig seismisk aktivitet (jordskalv i samband med istider inkluderas i centralscenariot)
3	Hydrologisk påverkan av gruvdrift eller brunnar i förvarets närhet
4	Otillräcklig tätning av schakt
5	Tillförsel av vätskeformigt avfall i en sprickzon nära förvaret
6	Tillförsel av vätskeformigt avfall i ett bristfälligt tätat schakt, kombinerad med dricksvattenuttag i en närbelägen brunn
7	Mänsklig påverkan på kemisk och hydrologisk miljö
8	Kemisk påverkan från gruvdrift

9.5 DISKUSSION

Den identifiering av scenarier som vi gjort i detta kapitel innehåller osäkerheter dels med avseende på fullständighetsproblematiken ("har vi bortsett från några viktiga yttre händelser, som borde ge upphov till scenarier?") och dels avseende scenariernas påverkan på processsystemet. I avsnitt 2.5 infördes scenario-osäkerhet som ett samlande begrepp för dessa osäkerheter.

Metodiken att genom sällning och gruppering sammanföra ett stort antal yttre händelser till ett fåtal scenarier beror till stor del på expertbedömningar, som kan kritiseras för subjektivitet. Därför är det mycket viktigt att alla steg i metodiken dokumenteras så att man efteråt lätt kan identifiera alla steg i dessa bedömningar. Processen bör också upprepas flera gånger av expertgrupper med olika sammansättning för att så långt möjligt omfatta olika kompetenser och infallsvinklar.

Scenarieanalysen blir en viktig del av underlaget inför kommande beslut i slutförvarsfrågor även om den inte ger förutsägelser om framtiden. Om systemet är robust för ett antal olika scenarier och inte uppvisar stora skillnader i form av utsläpp av radioaktiva ämnen är detta till fördel vid beslut om ett förvar skall få byggas eller inte.

10 GEOSFÄRENS UTVECKLING

I kapitel 7 beskrivs platsutvärderingen och de modeller den resulterat i. I detta kapitel redovisas hur dessa modeller använts för att beskriva hur slutförvarsplatsens (geosfärens) egenskaper utvecklas med tiden (referensfallet) och hur de påverkas av de klimatförändringar som ingår i centralscenariot. Resultaten från modelleringen ligger till grund för, och ger indata till, konsekvensanalysen (kapitel 15 och 16), d.v.s. formulering av beräkningsfall och beräkningar av vad som händer om en kapsel skulle gå sönder och börja läcka ut radionuklider. Informationsflödet mellan de olika analyserna framgår av figur 2.1. Motsvarande modellering av hur närområdet (d.v.s. de tillverkade barriärerna och berget kring själva slutförvaret) påverkas i framtiden beskrivs i kapitel 11.

10.1 INTRODUKTION

Kapitlet beskriver modelleringen inom områdena bergmekanik, hydrogeologi och geokemi. Den bergmekaniska analysen använder olika modeller för olika skalor, medan den hydrogeologiska analysen använder olika konceptuella modeller för att beskriva grundvattenflödet. Den geokemiska analysen i detta kapitel behandlar de grundvattenkemiska förutsättningarna för referensfallet och centralscenariot.

Informationsflödet mellan olika modeller är ofta inte enkelt och "rakt på" utan kan vara ganska komplicerat. Utdata från en modell kan t.ex. bli indata till flera andra modeller, och det finns också andra kopplingar mellan modeller. Analysschemat har därvid visat sig var ett bra hjälpmedel för kvalitetssäkring av informationsflödet. Den följande redovisningen går emellertid inte i detalj in på detta.

Beräkningarna i SITE-94 har inte fullt ut tagit hänsyn till kopplingar mellan hydrologiska, termiska, kemiska och mekaniska processer, vilket ger en grundläggande osäkerhet. Ett omfattande forskningsarbete pågår inom detta område som sannolikt kommer att ge bättre förutsättningar för att analysera sådana kopplingar i framtida säkerhetsanalyser.

10.2 BERGMEKANIK OCH TEMPERATUR

De bergmekaniska förhållandena i förvarsområdet påverkas redan i referensfallet av utsprängningen av förvaret, bentonitlerans svällning och bränslets värmeavgivning. För centralscenariot tillkommer påverkan från inlandsis och temperaturförändringar.

De direkta resultaten från analysen av *referensfallet* utgörs av temperaturfördelningar, bergspänningar och deformationer i berget. Det använda bränslet avger värme. Värmeproduktionen är störst direkt efter deponering, 1066 W per kapsel. Efter 1 000 år har den minskat till 73 W och efter 10 000 år till 16 W. Enligt beräkningarna för referensfallet uppnås en högsta temperatur i berget på något under 50°C efter 200 år. Resultat från beräkningar av bergspänningar tyder på att gamla sprickor sluts snarare än att nya öppnas. Det senare fallet kan dock också förekomma under vissa omständigheter. Förändrade

spänningar i "den störda zonen" nära tunnlar och schakt kan också påverka grundvattenströmningen.

För *centralscenariot* visar beräkningarna att permafrost kan nå ned till ett djup av ca 350 meter (efter 50 000 år). Värmeavgivningen från förvaret reducerar detta med bara ca 35 meter. En nedisning påverkar spänningsbilden ända ned till förvarsdjup, vilket kan förorsaka instabiliteter vid förvarets tunnlar. Det är också möjligt att detta kan ge upphov till nya sprickor i det intakta berget. Denna möjliga effekt bör studeras mer ingående än vad som kunnat göras inom SITE-94.

Spänningsförändringar orsakade av utsprängda utrymmen och inlandsisen är lättare att beräkna än inverkan av temperaturförändringar. Sådana s.k. kopplade effekter (mellan temperatur och bergmekanik) är nu föremål för ett omfattande utvecklingsarbete. Bland annat pågår på SKIs initiativ ett internationellt forskningsprojekt, DECOVALEX, inom detta område.

10.3 HYDROGEOLOGI

I avsnitt 7.3 beskrivs de hydrogeologiska modellerna som använts i SITE-94. I detta avsnitt redovisas deras tillämpning på geosfären medan närområdet behandlas i nästa kapitel. Syftet är att få fram parametervärden för beräkningar av radionuklidtransport (kapitel 15).

Referensfallet

Huvudsyftet med de hydrogeologiska beräkningarna för referensfallet är att kvantifiera de modell- och parameterosäkerheter som hänger samman med modelleringen av Äspö. Som framgår av avsnitt 7.3.3 finns det ingen entydig modell för hur grundvattenflödet vid Äspö ska modelleras. I SITE-94 används och jämförs därför flera olika modellkoncept vilket gör det möjligt utvärdera hur olika modellantaganden och parameterosäkerheter påverkar beräkningarna och på så sätt få en uppfattning om trovärdigheten i beräkningsresultaten. De modeller som använts är (se avsnitt 7.3.3):

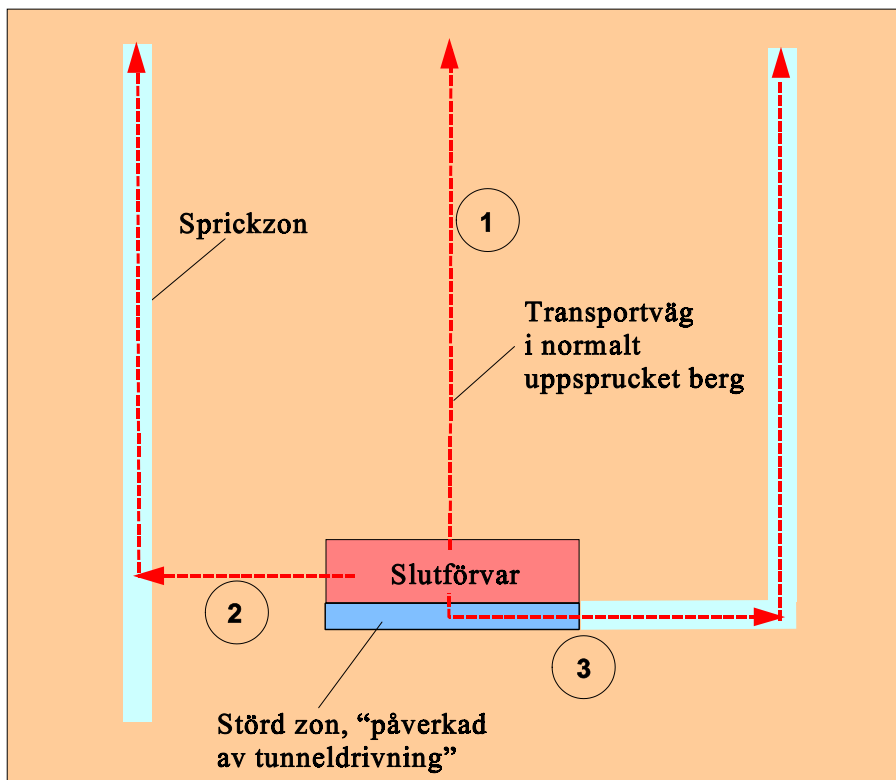
- enkel modell före överslagsberäkningar,
- diskret spricknätverksmodell,
- stokastisk kontinuummodell.

Figur 10.1 illustrerar hur olika hydrogeologiska alternativ har värderats med *den enkla modellen*. Figuren visar tre principiellt möjliga alternativ för vattnets (och därmed radionuklidernas) transport från förvaret till biosfären:

FALL 1: Transporten sker genom 600 meter berg med låg hydraulisk konduktivitet.

FALL 2: Transporten sker genom 10 meter berg med låg hydraulisk konduktivitet till en större sprickzon med mycket hög konduktivitet. I praktiken kan radionukliderna sägas ha nått biosfären när de kommer till en sådan zon.

FALL 3: Transporten sker först genom en högkonduktiv zon skapad vid utsprängningen av en deponeringstunnel, sedan genom en större sprickzon med mycket hög konduktivitet. Detta fall representerar mer eller mindre en kortslutning mellan förvar och biosfär.



Figur 10.1 Beräkningsfall för den enkla hydrogeologiska modellen. De olika transportvägarna (1-3) representerar olika antaganden om hur radionukliderna kan nå biosfären.

Den enkla modellen ger en första grov uppskattning om grundvattenflödet i slutförvaret och hur snabbt grundvattnet skulle kunna föra med sig radionuklider från slutförvaret till biosfären. Beräkningsresultaten visar att transporten skulle kunna gå mycket snabbt (några få år) om det finns en större vattenledande sprickzon i närheten av en läckande kapsel, åtminstone för sådana radionuklider som inte vidhäftar (sorberar) på bergets sprickor. Om radionukliderna däremot transporteras genom mindre vattengenomsläppliga sprickor i berget kommer det att ta många tusentals år eller mer innan de når biosfären. Den stora spridningen i beräkningsresultaten beror delvis på att berget i sig är mycket heterogent, d.v.s. har mycket varierande egenskaper. Den kritiska frågan är således om det går att få en bättre uppfattning om andelen snabba respektive långsamma transportvägar i berget. För att bättre kunna svara på denna fråga behövs mer detaljerade modeller som tar hänsyn till alla de data om berget som tagits fram i platsundersökningen.

I den ena detaljerade modellen, den *diskreta sprickmodellen*, antas flödet ske i de sprickor och sprickzoner som identifierats i den geologiska strukturmodellen, se figur 7.7. Riktigheten i denna modell beror naturligtvis på riktigheten i den geologiska strukturmodellen och som konstaterades i avsnitt 7.3.3 är det inte möjligt att identifiera varje enskild vattenförande spricka eller sprickzon. Därför har SITE-94 även använt en annan modell, en *stokastisk kontinuummodell*, som inte har några skarpa gränser mellan sprickzoner som leder vatten och ”tätt berg”.

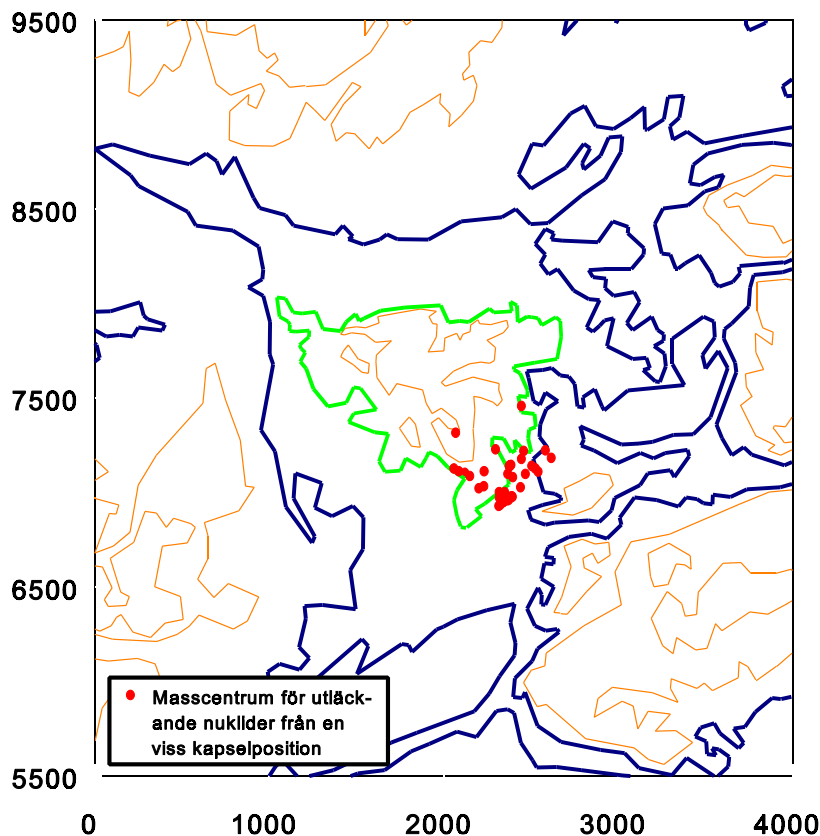
De detaljerade modellerna för Äspöområdet bekräftar den storskaliga strömningsbild som förutsades med den *regionala modellen* (se avsnitt 7.3.3). Alla modeller förutsäger att Äspö är ett utströmningsområde men de båda detaljerade modellerna, som tar hänsyn till bergets varierande egenskaper, visar på en komplex bild med stora lokala variationer av både flödets riktning och storlek i förvarsområdet och i berget mellan förvaret och biosfären. Figur 10.2 visar var eventuellt utläckande radionuklider skulle nå biosfären enligt beräkningarna med den diskreta sprickmodellen. Oberoende av vilken kapsel som går sönder i slutförvaret så transporteras radionukliderna mer eller mindre direkt upp till biosfären. Olika transportvägar från förvaret kan dock ha olika transporttid för grundvattnet. Beräkningarna visar på stora variationer från ett fåtal år till tiotusentals år. I framtida plats- och detaljundersökningar kan det behövas särskilda försök med spårämnen för att mer ingående kunna avgöra hur stora dessa variationer kan bli och om möjligt också för att man i ett förvar skall kunna undvika de snabbaste transportvägarna.

För beräkningar av radionuklidtransporten i kapitel 16 är framför allt två parametrar av intresse som resultat av de hydrogeologiska beräkningarna: *F-talet* och *Peclets tal*.

F-talet är ett mått på bergets förmåga att begränsa utsläpp av radionuklider till biosfären. Faktorer som påverkar detta är grundvattenflödets storlek, kontaktytan mellan grundvattnet och sprickväggarna och bergets förmåga att ta upp radionuklider genom diffusion och sorption. Ett lågt *F-tal* betyder liten fördröjning i radionuklidernas transport till biosfären och således förhållandevis stora utsläpp av radioaktiva ämnen. För sådana radionuklider som har mycket låg sorptionsförmåga, som jod-129, spelar detta emellertid inte någon större roll.

Peclets tal är ett relativt mått på hur radionuklider (eller något annat löst ämne) sprids ut (dispersion) när det transporteras med grundvattnet i berget (advektion). Om *Peclets tal* är litet innebär det att en del radionuklider transporteras snabbare än medelvattenhastigheten. Vissa nuklider som annars skulle ha tid att sönderfalla i berget kan på detta sätt nå biosfären. Dispersionen orsakas bl.a. av att vattnet strömmar olika fort i olika sprickor och att det finns olika långa transportvägar mellan kapseln och biosfären.

Figur 10.3 visar beräkningsresultat för den diskreta sprickmodellen avseende bergets barriäregenskaper. Varje enskild punkt i diagrammet visar de beräknade egenskaperna utmed en transportväg från en viss kapselposition i slutförvaret till biosfären. Punkterna som ligger längst till vänster i figuren (låga *F-tal*) representerar kapselpositioner där ett eventuellt kapselbrott och utläckage av radionuklider skulle leda till stora utsläpp i biosfären medan punkterna i den högra delen av figuren visar att det också finns kapselpositioner där berget har en mycket hög förmåga att begränsa eventuella utläckage.

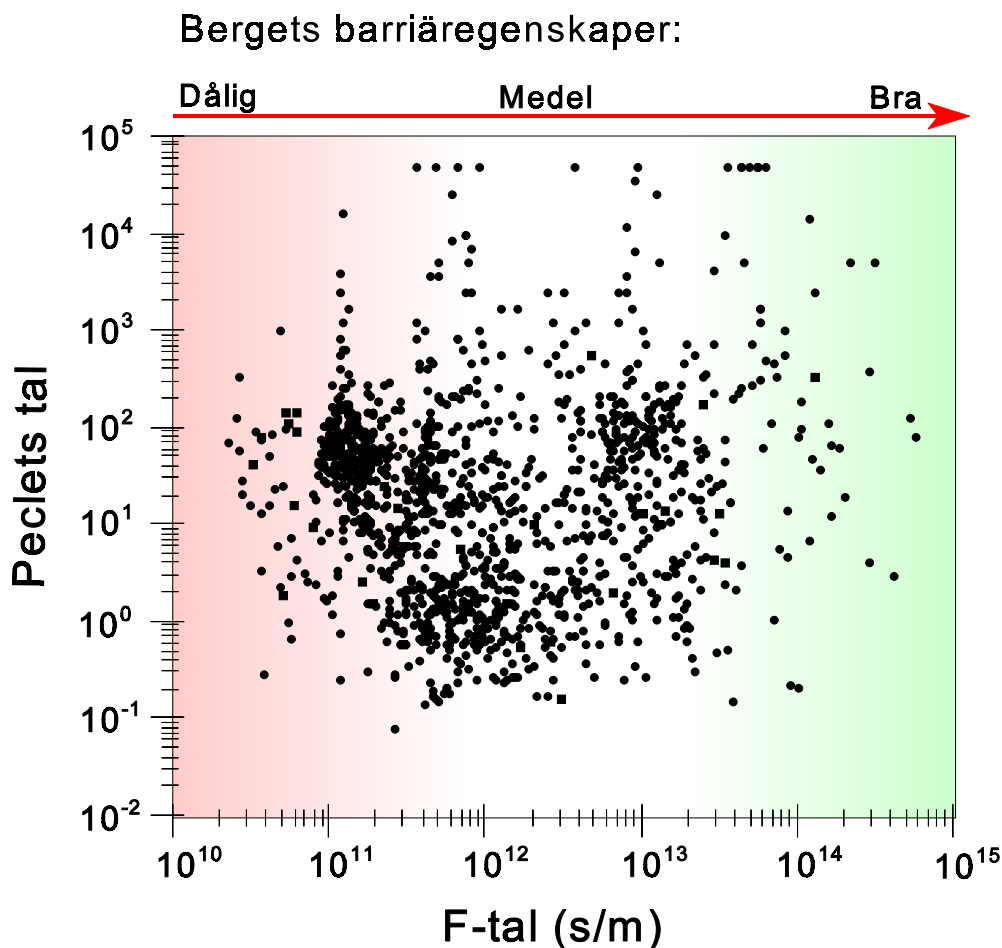


Figur 10.2 Utströmningsområde för radionuklider som läcker ut från det hypotetiska slutförvaret enligt beräkningar med den diskreta sprickmodellen för Äspö.

En slutsats är alltså att bergets förmåga att begränsa eventuella utsläpp av radionuklider är högst varierande beroende på var kapseln befinner sig i berget. Möjligheten att visa att man kan undvika ”dåliga positioner” för kapseln kommer således att bli en viktig säkerhetsfaktor i samband kommande platsundersökningar.

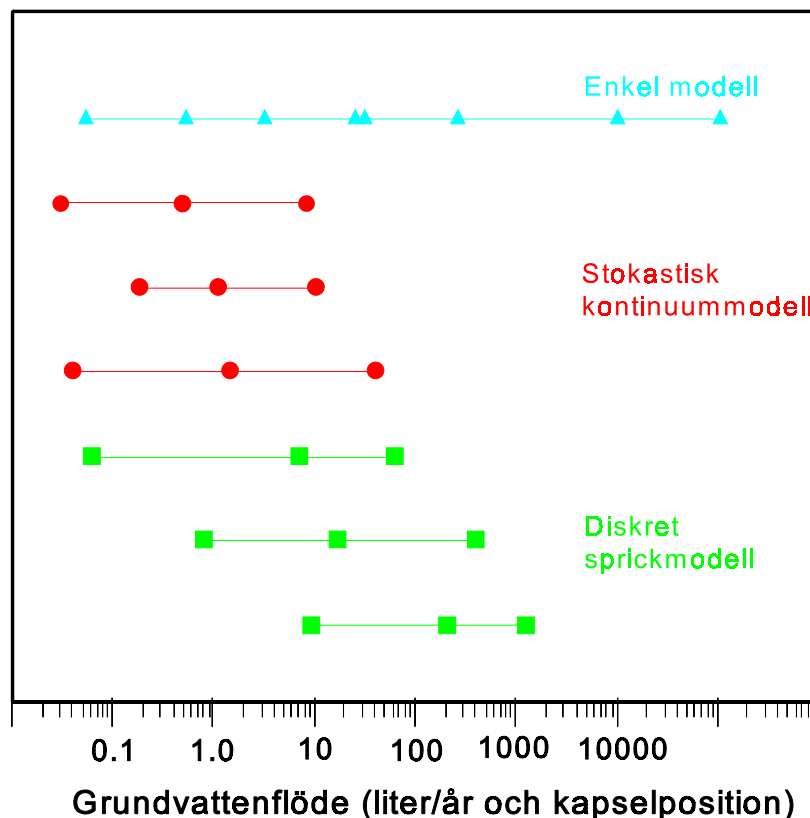
En annan viktig faktor, förutom grundvattenflödet, som påverkar beräkningarna av bergets barriärförmåga (F -talet) är hur effektivt radionuklider diffunderar in i bergets mikroporer och vidhäftar på mineralytor. Dessa processer påverkas av flera egenskaper i berget, t.ex. kontaktytan mellan grundvattnet och sprickväggarna (den flödesvätta ytan). Dessutom varierar vidhäftningsförmågan för olika radionuklider. Problemet är att det finns få data från platsundersökningen vid Äspö som kan användas för att bestämma dessa parametrar. I de hydrogeologiska beräkningarna med den diskreta modellen har därför flera olika värden på den flödesvätta ytan utvärderats, vilket bidrar till den stora spridningen i resultaten i figur 10.2. Med bättre metoder att bestämma denna parameter i fält skulle det alltså vara möjligt att göra mer exakta förutsägelser om bergets förmåga att begränsa och fördröja transport av radionuklider.

Den stokastiska kontinuum modellen ger delvis andra resultat (mindre spridning på Peclets tal), vilket visar att det finns osäkerhet om hur grundvattenflödet vid Äspö skall modelleras. Den typ av information som visas i figur 10.3 används i SITE-94 för att formulera beräkningsfall, se kapitel 15.



Figur 10.3 Beräkningar med den diskreta sprickmodellen av bergets förmåga att begränsa transport av radionuklider. Varje punkt i diagrammet visar den beräknade barriärförmågan utmed en transportväg från en enskild kapselposition i det hypotetiska slutförvaret till biosfären. Bergets förmåga att begränsa ev. utläckage av radionuklider ökar med ökande F-tal (längre till höger i diagrammet).

I figur 10.4 jämförs beräknade grundvattenflöden för olika varianter av de tre hydrogeologimodellerna. Flödessiffrorna i diagrammet anger hur många liter vatten som strömmar igenom en yta, lika stor som ett enskilt deponeringshål i berget, under ett år. Spridningen i flödesvärdena för de olika modellerna ger en uppfattning om hur mycket flödet varierar mellan olika kapselpositioner i det tänkta slutförvaret.



Figur 10.4 Beräkningar av grundvattenflöde i förvaransområdet med olika varianter av de tre hydrogeologiska platsmodellerna. För varje modellvariant anger den horisontella linjen hur mycket grundvattenflödet varierar mellan olika kapselpositioner. Skillnaden mellan de olika modellerna ger en fingervisning om osäkerheterna i beräkningsresultaten.

Skillnaden i resultaten för de olika modellerna är ett mått på de osäkerheter som är behäftade med modellerna. Bortsett från extrema fall med direkt förbindelse mellan förvaret och biosfären visar den enkla modellen samma variationsintervall som de båda mer detaljerade modellerna tillsammans. Detta skulle kunna tolkas som att arbetet med att ta fram data till de detaljerade modellerna inte har gett något extra utbyte. Emellertid ger de detaljerade modellerna annan information som man inte kan få från den enkla modellen, som t.ex. hur många kapslar som har hydraulisk förbindelse med berget och samband mellan olika parametrar. Den diskreta sprickmodellen förutsäger t.ex. att endast en tredjedel av alla kapselpositioner genomskärs av en spricka som har samband med någon annan vattenförande spricka eller sprickzon.

Beräkningar med den diskreta sprickmodellen och den stokastiska kontinuummodellen ger också en bild av rimliga variationer hos transportvägarnas egenskaper från en kapsel till biosfären, vilket kan jämföras med fallen i den enkla modellen (figur 10.1). En slutsats från dessa jämförelser är att FALL 1 måste bedömas som orealistiskt. Berget vid Äspö har för hög frekvens av ledande sprickor med inbördes samband för att en så lång transportväg med mycket låg konduktivitet skall kunna finnas.

Å andra sidan förefaller FALL 3 vara överdrivet pessimistiskt. Om man har tillgång till tillräcklig mängd information om platsen, och därmed får en tillräckligt detaljerad sprickmodell, bör osäkerheterna kunna reduceras så att sådana fall kan uteslutas från analysen. Sprickmodeller kommer sannolikt att få en mycket viktig roll i platsutvärderingar genom att de kan förutsäga hur stor andel av kapselpositionerna som kommer att vara "torra" och hur stor andel som kommer att vara hydrauliskt kopplade till större sprickstrukturer.

Centralscenariot

För centralscenariot har beräkningarna av grundvattenströmningen gjorts med en regional modell utmed en tvärsektion över södra Sverige, från södra delarna av Norge över Äspö till sydöstra delarna av Östersjön. Modellen behöver täcka in ett så stort område för att kunna ta hänsyn till de storskaliga klimatförändringar, med bl.a. nedisningar och havsnivåförändringar, som kan påverka grundvattenflödet under de närmaste 100 000 åren (se avsnitt 9.3). Den stora modellskalan innebär med nödvändighet att man inte kan ta hänsyn till alla detaljer i bergets struktur på samma sätt som i de detaljerade modellerna för Äspöområdet. Däremot tar modellen hänsyn till andra faktorer som kan påverka grundvattnets rörelser, t.ex. fördelningen av sött och salt vatten i berggrunden.

I förhållande till referensfallet leder centralscenariot till andra flödesriktningar och utflödesområden, delvis också andra flödesvärden. Permafrost kan t.ex. blockera utflöde vid Äspö så att transportvägarna blir längre. Flödesvärdena kan påverkas framför allt av smältande is under ett istäcke eller vid isfronten. Förhöjningen av flödesvärdena kan uppgå till en faktor tio och tiden för smältvattnet att nå förvaret kan bli så låg som 70 år. Detta betyder att syrerikt vatten skulle kunna komma ned till förvaringsnivå, vilket skulle påverka kapslarnas korrosion och transporten av radionuklider. Det finns indikationer på att detta faktiskt har skett vid tidigare istider, se avsnitt 7.4.

10.4 GEOKEMI

Syftet med detta avsnitt är att från den geokemiska karaktäriseringen enligt avsnitt 7.4 ta fram de data som behövs för den fortsatta analysen.

I en fullständig säkerhetsanalys måste transportvägarna för grundvatten och radionuklider kartläggas ur geokemisk synpunkt både i tid och rum. Detta skulle dock kräva en mer fullständig uppsättning av platsspecifika mätdata än vad som var tillgängligt i SITE-94. Här har istället arbetet fokuserats på att beskriva möjliga förändringar i grundvattenkemin för olika yttre betingelser.

Inga signifikanta ändringar i bergarternas sammansättning är att förvänta under miljoner år. När det gäller sprickmineral är det dock möjligt att vissa förändringar sker under kommande istider. Det finns också en möjlighet att syrerikt vatten kan tränga ned till förvaringsdjup i samband med en nedisning, vilket har blivit föremål för en särskild utredning

i SITE-94. Detta skulle kunna ta fem- till tiotusen år under ogynnsamma betingelser. Dessa slutsatser är dock preliminära.

Rimliga variationer av grundvattnets kemi har tagits fram för referensfallet och centralscenariot. För referensfallet antas syrefritt vatten (d.v.s. reducerande förhållanden) med medelhög salthalt på förvarsdjup, d.v.s. sådant vatten som finns där i dag.

För centralscenariot används två varianter av grundvatten. Den första varianten är syrefritt vatten med hög salthalt. Denna variant motsvarar ett fall då salt vatten kommer upp från stort djup, vilket möjligen skulle kunna inträffa då inlandsisen drar sig tillbaka över förvaret (i centralscenariot antas detta ske efter ungefär 70 000 år). Den andra varianten utgörs av oxiderande men ändå syrefattigt ytvatten med låg salthalt som tränger ned till förvarsdjup (detta skulle alltså också kunna ske i samband med en istid). Data för de tre varianterna har tagits från tre borrhål vid Äspö och det näraliggande Laxemar enligt tabell 10.1.

Tabell 10.1 Tre grundvatten för SITE-94.

Fall	Typ	Redox	Data från borrhål nr	Djup
referensfall (basfall)	medelhög salthalt (6 g klorid/lit)	syrefritt	KAS02	förvarsdjup (ca 500 m)
central-scenario	hög salthalt (47 g klorid/lit)	syrefritt	KLX02	djupt (1600-1700 m)
central-scenario	låg salthalt (0,02 g klorid/lit)	syrefattigt	HLX01	ytnära (0-50 m)

Data för grundvattnen enligt ovanstående tabell användes sedan bl a för beräkning av ändringar i närområdets kemi i kapitel 11 och av radionuklidernas löslighet i kapitel 12. Vid dessa beräkningar har man också i vissa fall förutsatt atmosfäriska syrehalter för att maximera effekten av att syrerikt vatten tränger ned på förvarsdjup.

11 NÄROMRÅDETS UTVECKLING

Närområdet omfattar förvarets tekniska barriärer och deras närmaste omgivning. I närområdet ingår också det använda bränslet självt vars egenskaper beskrivs i kapitel 3. Baserat på denna beskrivning och den beskrivning av övriga tekniska barriärer som ges i kapitel 8 handlar detta kapitel om närområdets utveckling under de förhållanden som gäller för referensfallet och centralscenariot.

11.1 INLEDNING

"Utifrån" räknat består närområdet av omgivande berg, lerbufferten, kapseln och kärnbränslet. Också det tunnelsystem som finns i förvaret räknas till närområdet. Närområdet påverkas av en rad processer som kan indelas i bergmekaniska, termiska, kemiska och hydrologiska processer. I följande avsnitt beskrivs översiktligt hur dessa olika effekter påverkar närområdets olika delar. I likhet med kapitel 10, som handlade om geosfärens utveckling, används resultaten som ingångsvärden till konsekvensanalysen.

11.2 BERGMKANISK OCH HYDROLOGISK PÅVERKAN

Referensfallet

Det använda kärnbränslet ger ifrån sig värme vilket medför att temperaturen höjs även i det omgivande berget. Denna temperaturhöjning är störst (några tiotal grader) ca 200 år efter deponering, varefter temperaturen åter sjunker sakta mot mer normala förhållanden. Temperaturförändringarna kan enligt beräkningar som gjorts i SITE-94 förorsaka spänningsförändringar vid tunnlar och deponeringshål som i sin tur lokalt kan leda till instabiliteter och viss uppsprickning av berget.

Temperaturvariationerna påverkar i de flesta fall befintliga sprickor i berget så att de sluts då temperaturen ökar och öppnas igen då temperaturen sjunker. Detta innebär att vattenflödet först minskar i kapslarnas omedelbara närhet för att senare återgå till naturliga förhållanden. Dessa effekter är emellertid inte lätta att förutsäga exakt och en del förändringar i sprickstrukturen kan också bli permanenta.

Avsnitt 10.3 beskrev hur grundvattenflödet modelleras i stor skala med olika modeller. Ett resultat var att grundvattenflödet varierar kraftigt inom förvarsplatsen (se figur 10.4). Detta gäller också berget vid själva förvaret. Modellberäkningarna leder i huvudsak till två viktiga slutsatser:

1. Många kapselpositioner är "torra", d.v.s. där finns inget vattenflöde. Endast 33 % av kapslarna står via grundvattnet i kontakt med det omgivande berget. Resultaten varierar dock beroende på vilken modell som används.

2. Den stora variationen innebär också att vattenflödet i närområdet bara är svagt korrelerat med flödet i större skala. Det innebär t.ex. att lågt flöde nära en kapsel inte garanterar att det också är lågt flöde längs transportvägen genom geosfären till biosfären för eventuellt utläckande radionuklider.

Centralscenariot

En istids påverkan på berget liknar de förändringar som förkommer i referensfallet på grund av bränslets värmeavgivning. Också i detta fall får man ett cykliskt förlopp med förändringar av spänningarna i berget som till stora delar återgår efter istiden. En del sprickor sluts på grund av trycket från inlandsisen för att åter öppnas då isen smälter. Ibland sker dock även bestående förändringar. Bergspänningarna kan också ge upphov till viss uppsprickning av berget vid tunnlar och deponeringshål, vilket innebär att nya vägar för grundvattnet kan öppnas och bli bestående.

En istid ger också en direkt påverkan på grundvattenflödet i närområdet. När inlandsisen gränsar till förvarsområdet, t.ex. strax efter då isen smält, blir grundvattenflödet ungefär 10 gånger större än under normala förhållanden.

11.3 LERBUFFERTEN

Lerbufferten har stor betydelse genom att den dels skyddar kapseln mot mekanisk och kemisk påverkan, dels utgör ett hinder för radionuklider som kommer ut genom kapseln. Leran har stor förmåga att ta upp vatten och svälla, vilket innebär att den kan fylla igen sprickor vid kapselhålet. Det är viktigt att dessa plastiska egenskaper bevaras under lång tid. Betydelsen av kemisk påverkan beroende t.ex. på komponenter i grundvattnet eller korrosionsprodukter från kapseln behöver därför studeras närmare. En annan möjlig effekt, som också skulle kunna ha negativ påverkan, är transport av gas genom leran. Gas skulle kunna komma från korrosion i kapselns stäldel.

Extremt försämrade egenskaper hos bufferten skulle kunna leda till en situation liknande den som skulle vara fallet om kapseln placerades i ett deponeringshål utan buffert. För att illustrera detta har ett sådant fall beräknats i konsekvensanalysen (se kapitel 16).

En komplett säkerhetsanalys måste beakta inte bara själva lerbufferten utan också återfyllnaden av tunnlar. Om denna skulle försämrats så skulle vattenflödet öka. En effekt som kan behöva studeras närmare är hur lerbufferten i deponeringshålen kan påverka återfyllnaden i tunnarna då leran sväller.

11.4 KAPSELN

Den tekniska utvecklingen av koppar/stål kapseln är nu inne i ett intensivt skede. Man kan därför inte nu *beräkna* tidsmässigt hur en kapsel skulle kunna gå sönder beroende på olika mekanismer. Vad som varit möjligt inom SITE-94 är att diskutera möjliga mekanismer och

utgående från detta *antaga* kapselfel i konsekvensanalysen. De mekanismer som diskuterats är av dels mekanisk, dels kemisk art.

Mekaniska processer

Kapseln måste kunna motstå betydande påfrestningar i förvaret. Således utsätts den på 500 meters djup för ett hydrostatiskt tryck på ca 5 MPa. Dessutom orsakar lerans svällning ett mekaniskt tryck på ca 10 MPa. Om leran skulle svälla ojämnt beroende på att vattenupptaget inte fördelas lika över kapselytan (variationer i vattenflödet) blir också tryckfördelningen ojämn, vilket kan leda till ytterligare ökade påfrestningar. Under en istid kan det yttre trycket öka till ca 30 MPa, från inlandsis med en tjocklek på 3 km. Sammantaget kan SKI inte utesluta att dessa mekaniska påfrestningar kan leda till att några av kapslarna går sönder, vilket i så fall sannolikt sker ca 50 000 år efter förslutning för ett slutförvar vid Äspö.

Korrosion

Som redan nämnts i avsnitt 8.1.2 kan kapseln utsättas för korrosion. I normalfallet kommer denna att ske mycket långsamt och kapseln behåller sin integritet över miljontals år. Korrosionen kan dock ske snabbare under vissa förhållanden, till exempel om syre tillförs kapseln via grundvattnet. Detta skulle kunna ske om syre som tillförts grundvattnet i förvaret under dess driftperiod på något sätt koncentrerades vid ett fåtal kapslar. Under den senare delen av en istid är det också möjligt att syrehaltigt vatten kan komma ned till förvarsdjup, vilket då skulle öka korrosionen. Liksom beträffande mekaniska processer bedömer SKI att ett fåtal kapslar skulle kunna utsättas för korrosion i samband med syretillförsel och därmed gå sönder under de första 100 000 åren.

Kapselfel i konsekvensanalysen

De resonemang om möjliga orsaker till kapselfel som kunnat föras i SITE-94 har varit av kvalitativ karaktär och leder inte direkt till några beräkningsfall i konsekvensanalysen. För att detta skall kunna göras behövs ytterligare forskning och utveckling. Den kunskap som ändå finns och målsättningen med SITE-94 att analysera betydelsen av platsegenskaper leder emellertid till följande antaganden för konsekvensanalysen:

1. Konsekvensanalysen postulerar kapselfel efter 1000 år, 10 000 år och 100 000 år.
2. Det finns inte underlag för att mer exakt uppskatta hur många kapslar som skulle kunna gå sönder tidigt. Konsekvensanalysen genomförs därför som en analys av utsläpp från en enda kapsel. I princip kan dock resultaten skalas upp med antalet kapslar i förvaret.

11.5 KEMISKA FÖRHÅLLANDEN

I detta avsnitt sammanfattas hur de kemiska förhållanden kan utvecklas i närområdet, d .v. s. de tekniska barriärerna och tunnelssystemet inklusive det närmaste omgivande berget.

11.5.1 Kemiska förhållanden och störningar i berget

Bergets ursprungliga egenskaper ur kemisk synpunkt utsätts för en störning i samband med att ett slutförvar sprängs (eller borras) ut, liksom under hela driftperioden. Inte heller efter tillslutning av förvaret återgår berget till det ursprungliga, "naturliga", tillståndet. För all framtid kommer det att utsättas för den störning som närvaron av återfyllnad och de tekniska barriärerna utgör.

Följande effekter behöver diskuteras i säkerhetsanalysen:

- Berget kommer att tömmas på vatten och stå i kontakt med luft under driftperioden. Detta medför främst att vissa mineral oxideras. Man kan därför t.ex. räkna med en viss nedsättning av bergets redoxkapacitet i närområdet. Detta kan i viss mån kompenseras genom att se till att buffert och återfyllnad har lämpliga egenskaper. Kontakten med markytan kommer också att medföra förändringar i mikrobiologin på förvarsnivå.
- Uppvärmningen av berget genom att bränslet avger värme påverkar kemiska jämvikter. Exempel på detta är en ökad utfällning av kalksten ("pannsten") runt deponeringshålen. Samtidigt ökar lösligheten för de flesta mineral, silikaterna, i vanliga bergarter.
- Olika ämnen kan också med tiden lösas ut från de tekniska barriärerna (bentonit, koppar och järn). I den mån betong används i slutförvaret leder detta antagligen till den kraftigaste av dessa kemiska störningar. Även här har effekten måttlig utbredning och berget har i sig en förmåga att ta upp störningar utan att det leder till väsentliga försämringar i dess funktion som barriär.

Sammantaget bedöms dessa störningar av bergets kemiska egenskaper vara av mindre betydelse. Någon särskild utvärdering av dem gjordes inte inom SITE-94. Detta kommer dock att krävas i en verklig säkerhetsanalys.

11.5.2 Kemiska förhållanden och förändringar i buffert och återfyllnad

Vad som sägs nedan gäller i första hand bufferten som beskrivs relativt detaljerat i SITE-94. Bentonit som ingår i återfyllnaden kommer att genomgå liknande omvandlingar.

Den troligaste omvandlingen, som kan gå relativt fort, är att bentonitens natrium byts mot kalcium. Detta gör att leran blir styvare och mister en del av sin förmåga till svällning. För högkompakterad bentonit är detta antagligen av mindre betydelse.

En annan omvandling av bentonit som kan medföra allvarigare konsekvenser är reaktioner med bl.a. kalium i grundvattnet varvid bentoniten övergår i en icke svällande lera, illit. För detta krävs inte bara relativt höga kaliumhalter i grundvattnet, utan också hög temperatur, närmare 100 °C och däröver. En preliminär bedömning är att detta inte är något problem för de tider som är aktuella i säkerhetsanalysen.

I SITE-94 ingick en utförlig analys av hur kemin utvecklas i närområdet. Detta är ett stort framsteg jämfört med tidigare säkerhetsanalyser. Genom beräkningar med ett geokemiskt modellpaket, EQ3/6, undersöktes reaktioner mellan grundvatten och bentonit. Hänsyn togs till närvaron av föroreningar i bentoniten såsom pyrit och kalcit. Beräkningarna gjordes för 15 och 80 °C och för grundvatten av olika sammansättning enligt kapitel 10. Sju olika fall av sammansättning hos bentonitens porvatten togs fram på detta sätt. Resultaten användes sedan för beräkning av radionuklidernas löslighet (kapitel 12) och som utgångspunkt för beräkningar av vidare reaktioner i kapsel och bränsle.

För bentonit visar resultaten att porvattnet är buffrat med hänsyn till lösta ämnen som påverkar lösligheten hos radionuklider. Exempel på specifika resultat är: att kalcium håller tillbaka koncentrationen av karbonat, att oxidation leder till sulfatbildning som höjer halten av t.ex. nickel, att aktuella förändringar i kloridhalt inte spelar någon roll, samt att fluorid och fosfat också kontrolleras av den relativt höga kalciumhalten.

11.5.3 Kemiska förhållanden i en genombruten kapsel

Före SITE-94 har det inte gjorts någon utförlig analys av de kemiska förhållandena i en skadad koppar-stål-kapsel. Den analys som här avses gäller alltså inte korrosionsförloppet, utan korrosion antas redan ha ägt rum så att korrosionsprodukter finns närvarande.

Analysen har gjorts på analogt sätt som för bentoniten. Som utgångspunkt antogs att den dominerande korrosionsprodukten är magnetit. Resultaten pekar på att vattnets sammansättning påverkas obetydligt i kapseln så länge järn förekommer i form av hydroxider och magnetit. Under vissa betingelser skulle dock pH kunna öka och leda till ändrade lösligheter för många radionuklider. Detta är en osäkerhet som bör utredas närmare inför kommande säkerhetsanalyser.

11.5.4 Radiolys och redoxförhållanden

Vi har tidigare berört några mekanismer som skulle kunna leda till oxiderande förhållanden (syrehaltigt vatten) vid förvaret. Det var då fråga om tillförsel av syre utifrån under förvarets driftperiod eller under en istid. Det finns också en process i själva förvaret som kan ge syrehaltigt vatten vid kapslarna, nämligen *radiolys*. Detta innebär att strålningen från kärnbränslet (främst alfastrålning) sönderdelar vatten i dess beståndsdelar, d.v.s. väte och syre. Radiolys kan förekomma antingen i ett tidigt skede om det finns vatten inuti kapseln efter tillverkning och förslutning, eller senare då en kapsel går sönder och släpper in vatten. Alfastrålning kan däremot inte tränga igenom en intakt kapsel och förorsaka radiolys utanför kapselytan.

Om radiolys skulle förekomma har det betydelse hur långt från bränslet som det kan bli oxiderande förhållanden i grundvattnet. Exempelvis påverkar detta hur snabbt utläckande radionuklider kan transporteras. Genom att det vatten som blivit syrehaltigt kan transporteras ut från kapseln kan man tänka sig att det uppstår en gränsyta, en s.k. *redoxfront*, mellan syrehaltigt och icke syrehaltigt vatten. Om det blir en sådan redoxfront,

och i så fall hur långt ut från kapseln den kommer, beror dels på radiolysens omfattning, dels på hur snabbt syret förbrukas t.ex. av järnhaltiga mineral. Beräkningar tyder på att det tar ca 400 år innan redoxfronten kommer ut genom lerbufferten och att den högst når en meter ut i berget under en miljon år. Dessa resultat är dock behäftade med stora osäkerheter, och det är också fullt möjligt att redoxfronten aldrig når utanför bufferten.

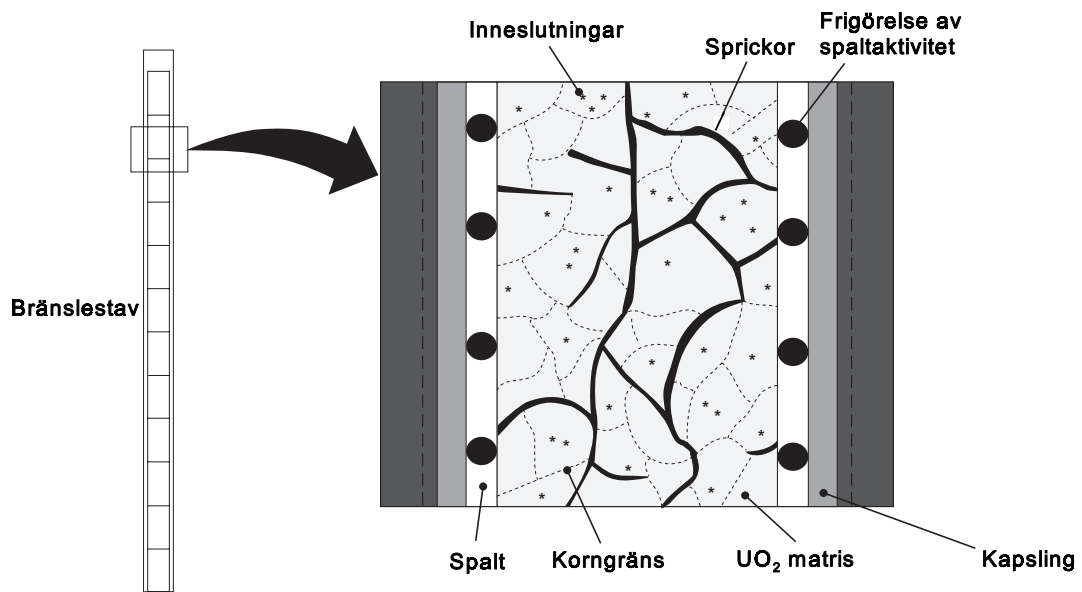
11.6 BRÄNSLEUPPLÖSNING

Det har bedömts som rimligt att anta att de flesta radionuklider upplöses i grundvattnet i samma takt som uranet med s.k. **kongruent upplösning** av bränslet. Hur snabbt detta sker beror bl.a. på hur mycket syre som produceras vid bränslet genom radiolys. Möjligheterna till detta minskar med tiden, varför den hastighet med vilken bränslet upplöses beror på när radiolysen kan börja. I normalfallet sker detta då en kapsel har gått sönder och börjat släppa in vatten. Tabell 11.1 visar den tid det tar att upplösa allt bränsle för olika tidpunkter för kapselbrott, enligt de beräkningar som gjorts i SITE-94.

Tabell 11.1 Tid för bränsleupplösning beroende på när kapseln går sönder.

Tid för kapselbrott (år)	Tid för upplösning av bränslet (år)
0	7 500
1 000	15 000
10 000	37 000
100 000	360 000

För några radionuklider sker utsläpp till grundvattnet snabbare än vad tabellen visar, d.v.s. det sker inte kongruent med övriga nuklider. Detta gäller framför allt cesium och jod som till en del kan lösas upp i grundvattnet direkt vid ett kapselbrott. Det gäller den andel av dessa radionuklider som finns i spalten mellan urankuts och det material som kapslar in bränslestavarna, s.k. **spaltfrigörelse**. En tredje typ av frigörelse gäller vissa radionuklider som sitter på korngränserna i bränslet (**korngränsfrigörelse**). Figur 11.1 ger en schematisk bild av bränslets struktur med uranmatris, spalt och korngränser. Korngränserna står i förbindelse med spalten genom sprickor i uranmatrisen.



Figur 11.1 Kärnbränslets struktur. Figuren visar olika sätt för radionuklider att frigöras från bränslet: från spalten, från korngränserna och kongruent med uranmatrisen.

12 RADIONUKLIDKEMI

För att kunna uppskatta den hastighet med vilken radionukliderna sprids från ett slutförvar är det nödvändigt att ha en uppfattning om deras rörlighet i olika barriärer och under olika förhållanden. Denna rörlighet bestäms i sin tur av kemiska reaktioner i vilka nukliderna deltar, främst nuklidernas tendens att fällas ut, d.v.s. deras löslighet, och deras tendens att fastna, sorberas, t.ex. på mineralytors längs transportvägarna. Detta kapitel beskriver hur radionuklidernas löslighet och sorption uppskattas i SITE-94. Resultaten används direkt i transportberäkningarna som redovisas i kapitel 15 och 16.

12.1 RADIONUKLIDERNAS LÖSLIGHET

Vissa radionuklider har låg löslighet vilket alltså leder till en begränsning av deras rörlighet i barriärsystemet. Lösligheten som vi här talar om hänför sig till *grundämnen*, d.v.s. den totala lösligheten avser summan för alla isotoper av grundämnet ifråga. För givna kemiska betingelser, främst grundvattnets innehåll av olika ämnen, dess pH och temperatur, går det att uppskatta lösligheten genom beräkningar som utgår från termodynamiska data som i princip gäller allmänt. Genom val av lämpliga förutsättningar kan man göra mer eller mindre realistiska uppskattningar av lösligheten. I en säkerhetsanalys gäller det att välja data som med stor sannolikhet leder till överskattning av lösligheten.

En svårighet vid beräkningar av lösligheter är brist på termodynamiska data eller data som grundar sig på bristfälliga mätningar. Relativt mycket arbete fick läggas ned i SITE-94 för att granska använda databaser och söka undvika felaktiga data. Att göra en fullständig genomgång av alla data låg däremot utanför det möjligas gräns. Detta arbete bedrivs f.ö. i internationellt samarbete, främst i regi av OECD/NEA, där SKI deltar i planering och finansiering av arbetet.

En väsentlig målsättning för SITE-94 har varit att utveckla metoder för att använda platsspecifika data i säkerhetsanalysen. När det gäller beräkning av radionuklidernas lösligheter innebär detta att grundvatten av olika slag antas reagera i tur och ordning med de olika barriärerna i närområdet: berg, bentonit, kapsel och bränsle. För var och en av barriärerna fås alltså egenskaper hos vattenfasen som i sin tur används för beräkning av radionuklidernas löslighet.

De grundvatten som använts vid beräkningarna har antagits hänga samman med följande förhållanden:

- horisontellt flöde av grundvatten med medelhög salthalt, vilket nära överensstämmer med dagens förhållanden på förvarsdjup, bl.a. en temperatur på 15 °C,
- dagens förhållanden med tidigt kapselbrott, d.v.s. hög temperatur i närområdet (ca 80 °C),
- uppåtriktat flöde av vatten med hög salthalt,

- nedåtriktat flöde av ytnära vatten i samband med istid (låg salthalt, reducerande närområde vid 15 °C),
- extrema förhållanden med snabbt nedåtriktat flöde, oxiderande betingelser på förvarsdjup, låg salthalt, 15 °C.

Sju olika fall räknades igenom som motsvarar olika förutsättningar enligt ovan (se tabell 12.1). Dessutom beräknades två ytterligare fall för att belysa effekten av ovissheter när det gäller val av fasta faser och termodynamiska data för dessa. Beräkningarna gjordes med det geokemiska programmet EQ3/6.

De beräkningar som gjorts utgör ett viktigt steg mot ökad realism i beskrivningen av den kemiska barriär som begränsningarna i löslighet kan utgöra för vissa radionuklider. I den mån denna barriär behöver tillmätas större betydelse finns det utrymme för ytterligare förbättringar, t.ex. när det gäller tillgång på relevanta termodynamiska data.

Tabell 12.1 Lösighetsberäkningar i SITE-94.

Beräkningsfall	Fall nr	Temp (°C)	Redoxförhållanden
<u>Referensfallet</u>			
basfall	1	15	reducerande grundvatten
tidigt kapselfel	2	80	reducerande grundvatten
redoxfront	3	15	reducerande grundvatten
			redoxfront mellan lera och berg
oxiderande förhållanden	4	15	oxiderande grundvatten
<u>Centralscenariot</u>			
djupt salt grundvatten	5	15	reducerande grundvatten
grundvatten med låg salthalt	6	15	reducerande grundvatten
oxiderande förhållanden	7	15	oxiderande grundvatten

12.2 SORPTION AV RADIONUKLIDER

De olika fenomen som gör att radionuklider fäster på spricktytor kallas gemensamt för sorption. I SITE-94 ingick inte att utveckla nya modeller eller ta fram nya data för sorption. Arbetet inriktades i stället på att ta fram en mer fullständig databas än den som användes i Projekt-90.

Radionuklidens förmåga att sorbera på sprickytorna beror dels på grundvattnets egenskaper (oxiderande eller reducerande), dels på vilka mineral som finns på sprickytorna. Sorptionsförmågan brukar anges med ett s.k. K_d -värde. Det definieras som förhållandet mellan ett ämnes koncentration i fast fas och dess koncentration i lösning: $K_d = C_{\text{fast}}/C_{\text{lös}}$. K_d -värden mäts i laboratorium där man har prover dels med vatten med önskade egenskaper (t.ex. grundvatten från förvarsdjup), dels med önskade bergarter eller mineral.

Radionukliderna fördröjs också i lerbarriären på grund av sorption. Därför omfattar data för SITE-94 också K_d -värden för leran. Sammanfattningsvis har SITE-94 använt fyra uppsättningar K_d -värden: för berget och för leran, vardera dels för oxiderande och dels för reducerande förhållanden.

För att förbättra databasen i förhållande till Projekt-90 gjordes en omfattande genomgång av litteratur och databaser. Huvudsakliga källor var:

- data i vetenskapliga artiklar och rapporter publicerade efter 1989,
- den databas som tagits fram av OECD,
- tidigare säkerhetsanalyser i Sverige och andra länder.

Från denna informationsmängd togs det fram K_d -värden relevanta för Äspö för användning i beräkningarna av radionuklidtransport. Data valdes ut för lera och berg (olika K_d -värden för ett och samma grundämne) samt för oxiderande och reducerande förhållanden. I många fall är K_d -värdena desamma för oxiderande och reducerande förhållanden. Det finns dock viktiga undantag som t.ex. neptunium och teknetium för vilka oxiderande förhållanden ger betydligt lägre K_d -värden, d.v.s. dessa radionuklider fördröjs mindre i syrerikt vatten.

Det sätt som man bestämmer K_d -värden med är föremål för kritik. Det kan bl.a. finnas problem beroende på att de prover som man har i laboratoriet kan ha andra egenskaper än vad samma material skulle ha i ett verkligt fall, d.v.s. intakt berg eller en fullständig bentonitbarriär. Sådana problem förtjänar uppmärksamhet i det fortsatta forsknings- och utvecklingsarbetet och innebär också att sorptionsdata väljs med försiktighet.

13 MODELLER FÖR TRANSPORT AV RADIONUKLIDER

Kapitel 10 och 11 har behandlat de viktigaste processerna för geosfärens och närområdets utveckling inom ramen för referensfallet och centralscenariot. Här beskrivs hur dessa processer har modellerats i SITE-94 för den konsekvensanalys som beskrivs i kapitel 15 och 16.

13.1 MODELL FÖR NÄROMRÅDET

Bränsleupplösning

Den första delen av modellen måste omfatta de mekanismer för utsläpp av radionuklider från bränslet som beskrivs i avsnitt 11.6, d.v.s. kongruent upplösning, spaltfrigörelse och korngränsfrigörelse. Den allra största delen av radionukliderna i bränslet antas lösas upp kongruent med uranmatrisen. En del av dem transporteras också bort från deponeringshålet i samma takt som bränslet löses upp, medan andra nuklidens borttransport begränsas av deras löslighet.

I SITE-94 antas att 10 % av jod, cesium och kol, samt 1 % av teknetium frigörs direkt från spalten. Dessa data stöds av experimentella belägg, även om osäkerheterna i vissa fall är relativt stora. Vidare antas att 100 % av strontium, 90 % av jod, cesium och kol samt 10 % av teknetium frigörs från korngränserna. I motsats till spaltfrigörelse är dessa inte omedelbart tillgängliga för borttransport utan upplösningen sker i en långsammare takt. Hur snabbt det sker är osäkert men i SITE-94 antas att det sker med en dryg tiotusendel på ett år.

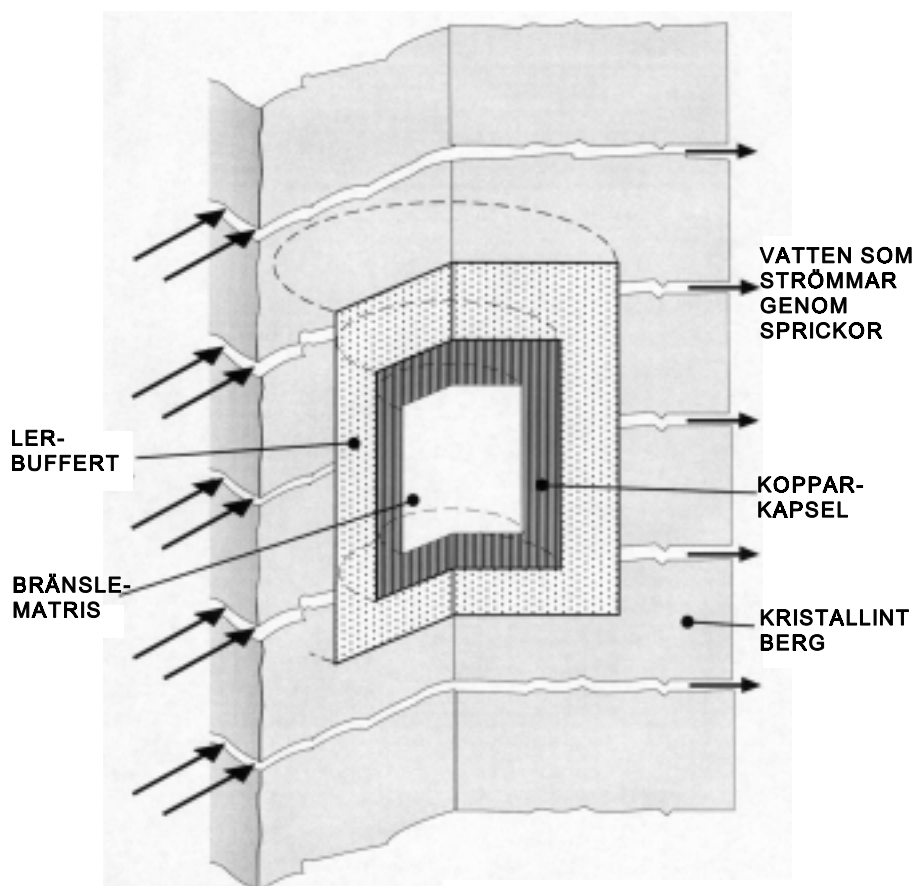
Transport av radionuklider

I närområdet sker i huvudsak två transportprocesser:

- transport av korrosiva ämnen i grundvattnet in till kapseln,
- transport av radionuklider i grundvattnet ut från bränslet genom lerbufferten till det omgivande berget.

Lerbufferten är mycket tät vilket innebär att dess innehåll av vatten är stillastående. Detta innebär att transporten av korrosiva ämnen in till kapseln och av radionuklider ut genom bufferten inte sker genom att vattnet rör sig utan genom molekylär *diffusion* i vattnet. Transporten blir därmed mycket långsam.

SITE-94 har använt en modell, kallad CALIBRE, för att beräkna nuklidtransporten i närområdet. Figur 13.1 visar schematiskt hur modellen är uppbyggd. Då en kapsel har gått sönder antar modellen att vattnet är i direkt kontakt med bränslet, att bränslet omedelbart börjar lösas upp, och att diffusionen genom leran börjar. Detta måste sägas vara ett pessimistiskt antagande då kapseln rimligen måste behålla en stor del av sin barriärfunktion

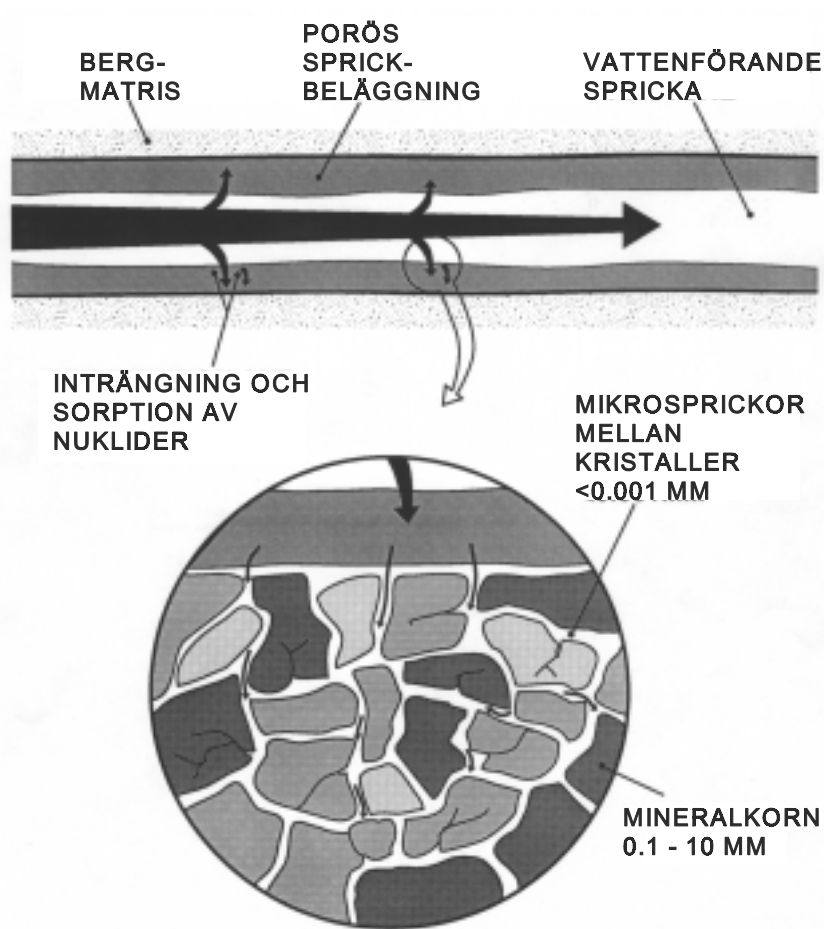


Figur 13.1 Modellen CALIBRE för transport av radionuklider i närområdet.

även efter att det uppstått en spricka i den. Å andra sidan är förloppen så komplicerade att det inte går att modellera dem i detalj, och då måste man göra pessimistiska antaganden. Förutom diffusion måste dock modellen kunna hantera t.ex. utbredningen av en redoxfront som påverkar radionuklidernas löslighet (se avsnitt 11.5), nuklidernas sorption i leran och deras radioaktiva sönderfall. Även de delar av berget som ligger närmast deponeringshålen ingår i närområdesmodellen.

13.2 MODELL FÖR GEOSFÄREN

Transporten av radionuklider i geosfären sker med grundvattnet i bergets spricksystem. Som nämns i avsnitt 12.2 fördröjs transporten av de flesta nuklider genom att de fastnar på sprickornas ytor (sorption). Den parameter som anger sorptionens styrka (K_d -värdet) ingår därför i geosfärsmodellen (som har fått namnet CRYSTAL). En annan och viktigare effekt är att nukliderna genom diffusion kan tränga in i det stillastående vatten som finns i bergets mikrosprickor (se figur 13.2), för att sorbera på dessa ytor. Hur mycket radionukliderna fördröjs av denna effekt beror främst på hur stor sprickyta som finns tillgänglig för diffusionen och på grundvattenflödet. I geosfärsmodellen anges detta genom F -talet (se avsnitt 10.3). Ju högre F -tal, desto större fördröjning. En annan viktig parameter i modellen



Figur 13.2 Radionuklidens transport och sorption i en spricka.

är *Peclets tal* (se avsnitt 10.3), som anger hur stor spridningen är längs med sprickorna där vattenflödet sker.

Sammanfattningsvis ingår följande processer i geofärsmodellen:

- grundvattnets flöde i bergets sprickor,
- spridningen längs dessa sprickor,
- inträngning i bergets mikrosprickor,
- sorption på sprickytor,
- radioaktivt sönderfall.

13.3 TRANSPORT GENOM FÖRVARETS TUNNLAR

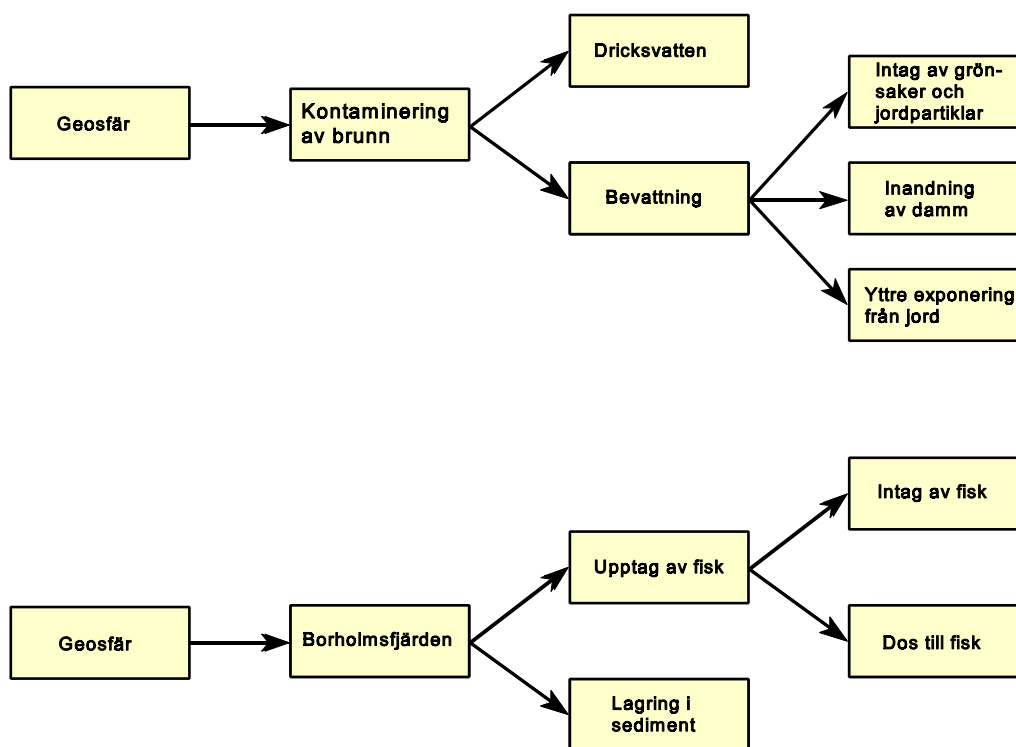
De modeller som beskrivs i detta och det föregående avsnittet behandlar transport av radionuklider i närområdet och genom berget till biosfären. Det finns en annan möjlig transportväg, nämligen från närområdet upp till den tunnel där deponeringshålet finns, sedan genom förvarets igenfyllda tunnlar och schakt till biosfären. Denna fråga har beaktats i SITE-94 med en enkel modell. Resultaten tyder på att denna transportväg kan försummas, men osäkerheterna är stora och problemet bör analyseras mer i detalj.

14 BIOSFÄREN OCH DOSBERÄKNINGAR

De radionuklider som når biosfären kan nå människan på flera olika sätt. Även för denna del av analysen behövs modeller. SKI har i SITE-94 använt resultat från en modell, utvecklad av Statens strålskyddsinstitut (SSI), för att beräkna de doser som detta kan ge upphov till. Modellen har använts både för referensfallet och centralscenariot.

Referensfallet

I referensfallet antas biosfären var oförändrad över tiden. Det vatten som kommit genom förvaret och kunnat kontamineras av radionuklider antas nå biosfären dels till en brunn som används för dricksvattenuttag, dels till Borholmsfjärden som omger Äspö. Figur 14.1 visar hur radionukliderna på olika vägar kan nå människan.



Figur 14.1 Radionuklidens väg från recipient till människa i referensfallet.

Centralscenariot

Inom centralscenariot, som beskrivs i avsnitt 9.3, förändras biosfären drastiskt ett flertal gånger, och biosfärsmodellen måste beskriva detta på ett förenklat sätt. Följande kommentarer kan göras om de olika transportvägarna:

1. En brunn antas finnas under 50 000 år. Enstaka brunnar kan upphöra att användas många gånger under denna tidsperiod, men för dosberäkningarna behöver det inte vara samma brunn. Det har inte bedömts som ett orimligt antagande att brunnar i området under mycket långa tider kan komma att användas t.ex. för dricksvattenuttag.
2. Borholmsfjärden kommer under samma tidsperiod att genom landhöjningen omvandlas från havsfjärd till insjö, varefter den uppdelas i två olika transportvägar för radionuklider:
 - insjön med fisk, som kan användas som föda,
 - sediment på nuvarande havsbotten som kan användas som jordbruksmark.

Dessa båda transportvägar antas finnas kvar under 50 000 år, varefter en nedisning når Äspö.

3. Efter den första istiden antas Östersjön återkomma som mottagare av radionuklider från förvaret.

Resultat

Biosfärsberäkningarna ger till resultat doser till människor i s.k. "kritisk grupp" givet ett visst inflöde av radionuklider till biosfären. Dricksvatten från en brunn ger de högsta doserna för både referensfallet och centralscenariot. Det är därför det enda fall som använts för att presentera resultaten från SITE-94 i form av dos.

15 BERÄKNINGSFALL I KONSEKVENSNALYSEN

Föregående kapitel har beskrivit olika processer som kan påverka utsläpp av radionuklider från förvarets närområde och deras transport i geosfär och biosfär. Särskild vikt har lagts vid viktiga parametrars variation och osäkerhet inom ramen för referensfallet och centralscenariot. I konsekvensanalysen i SITE-94 sammanställs all denna information till ett stort antal beräkningsfall, som dels söker uppskatta vilka doser som uppstår i referensfallet och centralscenariot, dels hur parametrarnas variation och osäkerhet slår igenom i osäkerheter för de beräknade doserna.

Antalet möjliga kombinationer av parametervärden är mycket stort och för konsekvensanalysen måste de reduceras till ett hanterligt antal. Detta har resulterat i 35 fall för närområdet och 29 fall för geosfären, vilka alla återfinns i huvudrapporten för SITE-94. Här ges endast en översiktlig framställning av de variationer som gjorts.

15.1 UTGÅNGSPUNKTER

Bakgrunden till beräkningsfallen återfinns på ett flertal ställen i denna rapport. I tabell 15.1 sammanfattas viktiga parametrar med referenser till relevanta avsnitt i rapporten.

Innehållet av olika nuklider får betraktas som känt och vara behäftat med små osäkerheter. Inga variationer av detta har därför gjorts i konsekvensanalysen. Bränsleupplösningen påverkas av redoxförhållanden och ingår på detta sätt i beräkningsfallen. För de nuklider som inte påverkas av redoxförhållandena (gäller främst spaltaktivitet, se avsnitt 11.6) har inga variationer gjorts. Inte heller biosfärsberäkningarna omfattar variationer.

Nedan beskrivs gjorda variationer inom ramen för referensfallet och centralscenariot.

15.2 REFERENSFALL

Utgångspunkt för konsekvensanalysen har varit ett *basfall*, med parametervärden som bedömts som lämpliga som grund för variationer för att utforska betydelsen av osäkerheter. Basfallet har konstruerats med rimliga parametervärden, varav en del har varit bästa uppskattning medan andra har varit pessimistiskt valda. I vissa fall där det inte varit möjligt att göra vare sig en bästa uppskattning eller en rimligt pessimistisk uppskattning har parametervärden postulerats. Detta gäller t.ex. tidpunkter för kapselbrott, se avsnitt 11.4.

Tabell 15.1 Översikt över viktiga parametrar med referens till avsnitt i rapporten.

Parametrar	Betydelse	Avsnitt
Hydrogeologiska parametrar - grundvattenflöde - F-tal - Peclets tal	uttransport från närområdet fördröjning i berg transport i berg	10.3, 11.2 10.3 10.3
Geokemiska parametrar - redoxförhållanden - lösligheter - K_d -värden	påverkar löslighet och K_d bränsleupplösning, transport fördröjning i lera och berg	11.5 12.1 12.2
Kapsel - tid till kapselbrott	tid för påbörjade utsläpp	11.4
Buffert - barriärfunktion	utsläpp till berget	11.3
Nuklidinnehåll	potentiell risk	3.2
Bränsleupplösning	utsläpp till buffert	11.6
Biosfären	utspädning, anrikning, dos till kritisk grupp	14

Hydrogeologiska parametrar

Hur grundvattenflödets storlek och riktning har beräknats framgår av avsnitt 10.3. I referensfallet är Äspö ett utströmningsområde. Det visar sig att hydrogeologin i övrigt kan sammanfattas med de båda parametrarna F-tal och Peclets tal som introduceras i avsnitt 10.3. Förutom basfallet ingår ett antal variationer av dessa parametrar som representerar osäkerheter och variationer i bergets egenskaper.

Konsekvensanalysen görs med två modeller, en för närområdet och en för geosfären, som beskrivs i kapitel 13. Frågan uppstår om de hydrogeologiska parametrarna skall ha samma eller olika värden i de båda modellerna. Som framgår av avsnitt 11.2 innebär den stora variationen av bergets egenskaper att närområde och geosfär i många fall kan betraktas som oberoende av varandra. Detta innebär att variationer av parametrarna kan göras var för sig i de båda modellerna. Med andra ord måste t.ex. ett högt F-tal för närområdet kunna kombineras med ett lågt värde i geosfären.

Geokemiska parametrar

Huruvida grundvattnet är syresatt eller inte är avgörande för många nuklidens löslighet och fördröjning i buffert och berg. Av tabell 12.1 framgår att syrefritt vatten är basfallet, men att konsekvensanalysen också beräknar konsekvenserna av oxiderande grundvatten. Detta fall måste betraktas som mycket osannolikt för referensfallet.

Nuklidernas löslighet beror således av vattnets redoxförhållanden. I övrigt görs inga variationer av lösligheterna. I stället har SITE-94 valt att använda pessimistiska, d.v.s. höga, löslighetsvärden. Även sorptionen styrs i första hand av redoxförhållandena. För K_d -värdena omfattar dock konsekvensanalysen en variation där de har minskats med en faktor 3 jämfört med basfallet.

Kapsel

I basfallet antas att läckage genom kapseln börjar efter 1 000 år. Som framgår av avsnitt 11.4 ingår också variationer då detta inträffar efter 10 000 år och 100 000 år.

Buffert

I basfallet antas bufferten fylla sin funktion som barriär mot grundvattentransport vid kapseln. För att illustrera buffertens betydelse för säkerheten finns också ett fall där leran antas har förlorat sina egenskaper som barriär.

15.3 CENTRALSCENARIOT

Centralscenariot har analyserats med två variationer, ett fall med reducerande och ett fall med oxiderande grundvatten. I båda fallen finns en period med en faktor 10 högre flöde. Framför allt på grund av begränsningar i modellerna för radionuklidtransport har inte fler variationer av flöde, flödesriktning och kemiska förhållanden gjorts för centralscenariot.

16 RESULTAT FRÅN KONSEKVENSPANALYSEN

Här summeras resultaten från beräkningarna i konsekvensanalysen med avseende på dominerande radionuklider och betydelsen av olika osäkerheter. Slutsatser av mer generell natur gällande resultatens betydelse för säkerheten diskuteras i kapitel 17 och 18. Det bör observeras att resultaten återger endast en av flera möjliga transportvägar i biosfären till människan, d.v.s. dricksvatten från en brunn i förvarets närhet. Denna transportväg bedöms dock som den som i de flesta fall ger den största dosen. Det måste också observeras att resultaten visar dosbidrag från en kapsel. Innebörden av detta diskuteras i avsnitt 16.3.

16.1 REFERENSFALLET

Basfallet

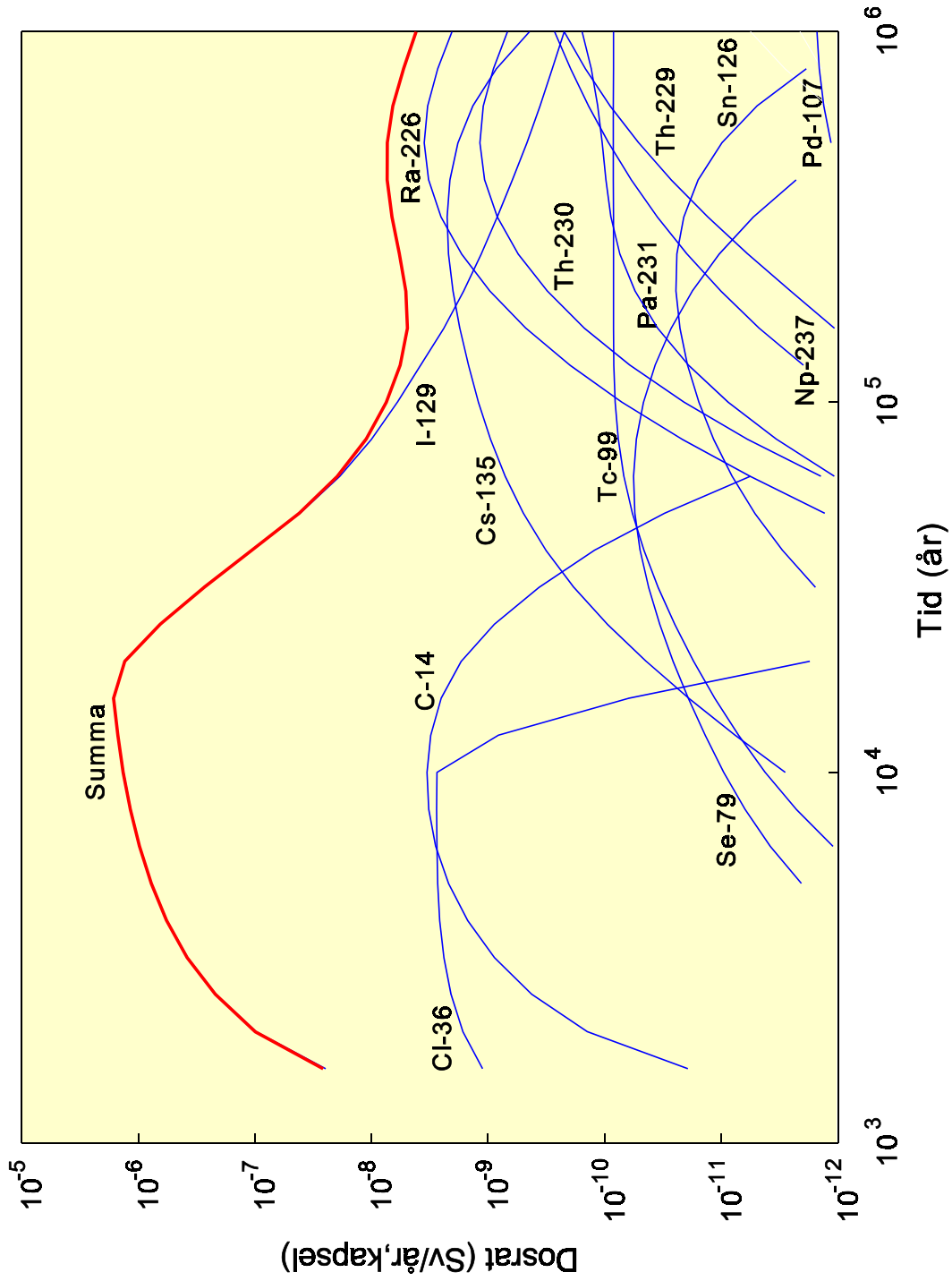
I basfallet där en kapsel antas gå sönder efter 1000 år ger jod-129, som inte begränsas av löslighet eller sorption, störst dosbidrag (2×10^{-6} Sv/år). Övriga potentiellt viktiga nuklider fördröjs så mycket att de till stor del hinner sönderfalla innan de når biosfären. Figur 16.1 visar doser från olika nuklider som funktion av tiden. Av figuren framgår att maximal dos från jod-129 uppnås efter ca 20 000 år. Dosbidraget från jod-129 är ca 2000 gånger lägre än den årliga genomsnittliga dosen till individer i Sverige.

Variation av hydrogeologiska parametrar

Den allt igenom viktigaste parametern för radionuklidernas fördröjning är F-talet. I basfallet är F-talet tillräckligt högt för att sorberande radionuklider skall hinna sönderfalla i geosfären. För betydligt lägre F-tal minskar geosfärens betydelse som barriär betydligt och doserna domineras av sorberande nuklider som radium-226 (4×10^{-6} Sv/år). Även bidragen från t.ex. plutonium-239 och americium-243 ökar med flera tiopotenser jämfört med basfallet. Man måste således dra slutsatsen att geosfären har mycket hög potential som fördröjande barriär, men att det också finns transportvägar där barriärfunktionen är utan betydelse.

Variation av geokemiska parametrar

Den mest betydelsefulla geokemiska faktorn är redoxförhållandena, som påverkar både löslighet och sorption. I ett beräkningsfall som kombinerar oxiderande förhållanden i närområdet och geosfären dominerar neptunium-237 med en dos på 10^5 Sv/år per kapsel och år, medan samma nuklid i basfallet ger helt försumbara doser. Förklaringen är en mycket stor skillnad i löslighet och sorption mellan oxiderande och reducerande vatten. Totalt sett ger ändå detta fall ett ökat dosbidrag på bara en faktor 5, eftersom bidragen från jod-129 inte påverkas av dessa variationer. Det måste också poängteras att oxiderande förhållanden i geosfären måste bedömas som mycket osannolikt i referensfallet.



Figur 16.1 Doser i basfallet med olika nuklidens bidrag.

I ett annat beräkningsfall, där sorptionen minskas med en faktor 3 för både närområdet och geosfären domineras dosbidraget av radium-226 (2×10^{-5} Sv/år). I basfallet ger radium ungefär 10 000 gånger mindre dosvärde. Detta beräkningsfall visar tydligt sorptionens betydelse för dosernas storlek. Man bör dock hålla i minnet att de flesta av de beräkningsvariationer som gjorts både för hydrologiska och geokemiska parametrar ger små eller helt försumbara dosbidrag.

Buffertens påverkan

Buffertens betydelse som barriär har illustrerats med ett beräkningsfall för närområdet, där leran har förändrats så mycket att grundvattnet kan röra sig fritt in till kapseln vilket innebär att nuklidtransporten inte begränsas av diffusion. Resultaten visar att många nuklider når biosfären i betydande mängder om bufferten saknas. De flesta av dessa nuklider fördröjs så mycket i geosfären att de inte ger ökade doser. Ett specialfall är dock jod-129. Även om denna nuklid inte sorberas innebär transport med diffusion genom leran att dess utsläpp till geosfären sprids ut över tiden. Utan buffert finns inte denna effekt vilket innebär att all jod-129 som finns i spalten mellan bränslet och dess kapsling släpps ut omedelbart efter kapselbrott. Detta skulle kunna ge ca 100 gånger så höga utsläpp till geosfären som i basfallet.

Kapselns livstid

Kapselns barriärfunktion är unik i hela systemet på så sätt att så länge den är intakt kan det inte bli några utsläpp som kan ge dos. Dess absolut viktigaste funktion är att helt förhindra utsläpp under de första 1000 åren då de farligaste nukliderna sönderfaller. Kapselbrott mellan 1000 och 100 000 år ger i praktiken samma dos oberoende av när det sker. En viktigare parameter är hur många kapslar som kan gå sönder under samma tidsperiod. Ju fler kapslar som samtidigt går sönder, desto högre blir den resulterande dosen.

16.2 CENTRALSCENARIOT

Den första delen av centralscenariot (före istiden) är identisk med referensfallet. Under denna tid infaller det maximala dosbidraget från jod-129 på 2×10^{-6} Sv/år. För andra nuklider fås betydligt högre doser i centralscenariot beroende på högre vattenflöde och oxiderande förhållanden som påverkar både lösligheter och sorption. Dessa doser bli dock inte större än den tidigare dosen från jod-129.

Detta skulle leda till slutsatsen att en istid inte påverkar maximal dos till kritisk grupp. Det kan emellertid finnas effekter av en istid som inte analyserats i SITE-94. Exempelvis kan nuklider som stannat nära förvaret på grund av låg löslighet komma att lösas ut och transporteras iväg om syrehaltigt grundvatten når ned till förvaret. Det är emellertid osäkert om denna effekt (att syrehaltigt grundvatten når förvaret) över huvud taget uppstår.

16.3 DOSER FRÅN HELA FÖRVARET

Konsekvensanalysen och därmed alla dosvärden som redovisats här gäller för en kapsel, som antagits släppa igenom radionuklider. En fullständig säkerhetsanalys för ett helt förvar måste ta hänsyn till att ca 4000 kapslar placeras i ett berg med varierande egenskaper. Beroende på alltför stora osäkerheter, framför allt därför att kapseln fortfarande är under utveckling, har det inte bedömts som realistiskt att försöka beräkna hur tidpunkterna för kapselbrott kommer att fördelas över förvaret beroende på variationer i grundvattenflöde och kemiska förhållanden, vilket skulle behövas för en sådan analys. Resultaten i SITE-94 kan i stället användas för att "räkna baklänges" för att uppskatta hur många kapslar som måste vara skadade under olika förhållanden för att beräknade dosvärden skall överstiga den dosgräns på 10^{-5} Sv/år som SSI förslagit. Resultaten visar att endast ett fåtal kapslar samtidigt får ge utsläpp för att denna dosgräns inte skall överskridas i basfallet.

17 RESULTATENS BETYDELSE

Resultaten från konsekvensanalysen ger viktig kunskap om hur säkerhetsanalysen skall utvecklas för framtida behov. De ger också insikter om barriärfunktioner och viktiga osäkerheter. Här görs en kortfattad genomgång av olika lärdomar med avseende på den övergripande systemförståelsen, de tekniska barriärerna, geosfärens egenskaper och behovet av kvalitetssäkring.

17.1 SYSTEMFÖRSTÅELSE

För att avgöra vilka processer man behöver ta hänsyn till i säkerhetsanalysen har SITE-94 utvecklat metodiken med *influensdiagram* som beskrivs i avsnitt 2.2. En allmän bedömning är att influensdiagrammet i SITE-94 är relativt fullständigt, d.v.s. det innehåller i stort sett alla de processer och kopplingar dem emellan som har betydelse. Osäkerheterna kan vara större om den relativa betydelsen av olika kopplingar. Under alla förhållanden är influensdiagrammet ett medel för kvalitetskontroll och granskning.

SITE-94 har också utvecklat ett *analysschema* (se avsnitt 2.4) som visar de modeller som använts och hur de kopplar till varandra. Om man jämför analysschemat med influensdiagrammet bör man få en uppfattning om hur relevant konsekvensanalysen har varit, d.v.s. om den inkluderat de viktigaste processerna. En sådan jämförelse visar att några processer som bedömts som viktiga inte fått motsvarande uppmärksamhet i konsekvensanalysen. Detta gäller t.ex. konsekvenserna av gasbildning i kapseln med påföljande gastransport genom leran. Andra exempel på områden som förtjänar mer uppmärksamhet i framtida analyser är mikrobers eventuella betydelse för korrosion av kopparkapseln och lerans långsiktiga egenskaper.

SITE-94 har fokuserat på två *scenarier*, referensfallet och centralscenariot. Ett antal övriga scenarier har identifierats (tabell 9.1), men inte analyserats. Det är uppenbart att framtida säkerhetsanalyser måste utvidga analysen till att omfatta också dessa scenarier. Ytterligare ansträngningar behöver också göras för att identifiera yttre händelser som kan ge upphov till nya scenarier.

17.2 TEKNISKA BARRIÄRER

Som redan poängterats är kapselns första funktion att helt förhindra utsläpp under de första 1000 åren. Även om ett kapselbrott mellan 1000 och 100 000 år ger i stort sett samma dos oberoende av tidpunkt visar konsekvensanalysen att endast ett fåtal kapslar samtidigt får ge utsläpp för att SSIs dosgräns för kärntekniska anläggningar (0.1 mSv per år) inte skall överskridas. Korrosionsstudier visar att kapslarna i själva verket kan komma att behålla sina egenskaper även längre än 100 000 år. Än så länge behäftas emellertid kapselstudierna med stora osäkerheter, som kan minska först när kapseln är färdigutvecklad, procedurer för kvalitetskontroll finns framtagna, och fullskaliga tester har gjorts.

Liknande slutsatser kan dras beträffande lerbufferten. Dess kanske viktigaste funktion är att förhindra vattenflöde vid kapslarna, vilket innebär att den inte får brytas ned mekaniskt eller kemiskt. Det finns ett antal olika mekanismer som behöver studeras närmare för att säkerställa detta, som t.ex. gastransport och bergmekanisk påverkan.

17.3 GEOSFÄREN

Resultaten från SITE-94 stöder generellt SKBs tidigare slutsatser att geosfärens främsta uppgift är att säkerställa stabila och goda förhållanden för de tekniska barriärerna, samt att också fungera som barriär genom att fördröja radionuklidernas transport till biosfären. Konsekvensanalysen visar att geosfärens fördröjande funktion varierar i hög grad mellan olika platser i berget, vilket betyder att en del kapslar kan komma att finnas i dåliga positioner med relativt snabba transportvägar för nukliderna till biosfären medan många kommer att finnas i "torrt berg".

Det är angeläget för kommande platsundersökningar att i största möjliga utsträckning kunna reducera den osäkerhet detta innebär, t.ex. genom en kombination av spårämnesförsök och kartläggning av vattenledande spricksystem. Analysen i SITE-94 visar att platsundersökningen på Äspö inte har varit tillräckligt detaljerad för att identifiera alla spricksystem av betydelse för säkerhetsanalysen. Det bör dock framhållas att undersökningarna på Äspö inte gjorts med detta syfte.

Även om de bergmekaniska analyserna inte har visat på någon större påverkan på bergets egenskaper bör man fortsättningsvis uppmärksamma risken att omfördelade bergspänningar beroende på bränslets värmeavgivning eller en kommande istid skulle kunna orsaka deformationer vid deponeringshål och tunnlar. Modellerna som använts för denna del av analysen är i ett tidigt stadium av sin utveckling och behöver utvecklas vidare.

17.4 KVALITETSSÄKRING

Inom kärnkraftsområdet finns sedan länge etablerade procedurer för kvalitetssäkring som tillgodoser högt ställda krav. Sådana procedurer måste nu förstärkas inom kärnavfallsområdet. Det gäller vid konstruktion, byggande och drift av anläggningar men även t.ex. vid platsundersökningar och säkerhetsanalys.

SITE-94 hade inga formella procedurer för kvalitetssäkring, men flera inslag i metodiken bidrar till utveckling av sådana procedurer:

- influensdiagrammet är ett verktyg för dokumentation och granskning av systembeskrivningen,
- analys-schemat dokumenterar hur modeller använts, och kan användas för att granska om alla viktiga processer har ingått i analysen,
- platsutvärderingen av Äspö (kapitel 7) har givit vissa anvisningar gällande kvalitetssäkring av såväl rådata som bearbetade data.

18 SLUTSATSER

Genom SITE-94 har SKI tagit steget från allmänna till platsspecifika säkerhetsanalyser, vilket har inneburit ett tidskrävande utvecklingsarbete. Varje organisation som tar detta steg torde komma att stå inför liknande utmaningar. Detta pekar på ett behov av att tillämpa och utvärdera metoder för platsspecifika säkerhetsanalyser på ett tidigt stadium av varje slutförvaringsprogram.

Även om det på intet sätt är fråga om en fullständig säkerhetsanalys av ett slutförvarssystem har arbetet med SITE-94 tillfört nya kunskaper och bidragit till metodutveckling inom säkerhetsanalysen. Främst kan nämnas följande:

- Projektet har medfört framsteg med avseende på metodik för säkerhetsanalyser, utvärdering och assimilering av platsspecifika data samt hantering av osäkerhetsfaktorer och scenarier. SKI har fått tillgång till metodik som tidigare varken förelåg inom ramen för det svenska nationella programmet eller kunde överföras från projekt för slutförvaring av radioaktivt avfall utomlands.
- Arbetet har tydligt identifierat viktiga frågor för säkerheten hos ett djupförvar. Dessa resultat kommer att vara till hjälp för att ange vad SKI förväntar sig av SKB i en framtida tillståndsansökan.
- Arbetet har tydligt visat på SKIs kapacitet att genomföra säkerhetsanalyser samt de verktyg SKI har tillgång till för att granska en ansökan.
- Arbetet har identifierat områden där ytterligare arbete måste genomföras för att lösa återstående tekniska frågor.

Dessa fyra typer av resultat diskuteras i de följande avsnitten.

18.1 TEKNISKA FRAMSTEG

Metoder för platsutvärdering och hantering av osäkerheter

Ett centralt tema i projektet har varit att bestämma hur platsspecifika data ska användas i säkerhetsanalysen och att utvärdera hur osäkerheter i platsundersökningarna påverkar resultaten av säkerhetsanalysen.

Spårbarhet för platsspecifik information

Stora ansträngningar har gjorts för att förbättra kopplingen mellan uppmätta data och användningen av dessa data i säkerhetsanalysen. Det är uppenbart att det endast är mycket sällan som fälldata används direkt i beräkningar avseende frigörelse och transport av radionuklider. I stället tolkas "rådata" av experter inom geologi, bergmekanik, hydrogeologi och geokemi, som omvandlar dem till parametrar för konsekvensanalysen.

Stor möda har också lagts vid att registrera datakällor och att dokumentera såväl analyser som mera bedömningsmässiga värderingar av data. Sådan information förefaller vara avgörande för planering av ett platsundersökningsprogram, liksom för SKI i dess arbete med att bedöma värdet av sådana program.

Hantering av osäkerheter hos data och modeller

Platsutvärderingen inom SITE-94 har gjort stora framsteg i hantering av variationer i berget och osäkerheter hos såväl modeller som data. Den utvecklade metoden tillämpades fullt ut i den hydrogeologiska utvärderingen.

Fältdata utgör vanligen tolkningar av mätresultat för specifika (ofta förenklade) modeller. I syfte att kunna använda fältdata för andra modeller måste resultaten från mätningarna i fält ofta tolkas om. Som exempel kan nämnas att en sådan omtolkning av resultat från borrhålmätningar resulterade i en ökning av permeabilitetsvärdena med en storleksordning.

För att få en så bra förståelse som möjligt av egenskaperna på en slutförvarsplats är det nödvändigt att göra en samlad utvärdering av geologiska, hydrogeologiska, geokemiska, och bergmekaniska data från platsundersökningen. De metoder som utvecklats inom SITE-94 för analys av olika typer av geologiska, geofysiska, hydrogeologiska och geokemiska borrhålsdata är ett första steg mot en sådan samlad utvärdering. Speciellt har användningen av datorprogram för visualisering och presentation av olika mätdata visat sig vara mycket användbar, bl.a. för att upptäcka samband mellan olika parametrar och eventuella felaktigheter i mätdata.

För den detaljerade modelleringen av grundvattenflödet visar analyserna hur olika modeller kan tillämpas i syfte att hantera osäkerheter i modellbeskrivningen. Analyserna visar även att detaljerade modeller tillåter en distinktion mellan den rumsliga variationen och faktiska osäkerheter i parametervärden för konsekvensberäkningar.

Säkerhetsanalysmetodik

SITE-94 projektet har resulterat i att en systematisk metodik tagits fram för säkerhetsanalysen. Betydande framsteg har gjorts med avseende på:

- En rigorös metodik för hantering av FEPs, d.v.s. Egenskaper ("Features"), Händelser ("Events") och Processer ("Processes) och deras kopplingar med hjälp av influensdiagram.
- En kvantitativ teknik för att hantera osäkerheter med expertbedömningar.
- En procedur som integrerar olika aktiviteter i säkerhetsanalysen (dataurval, val av modeller, framtagning av beräkningsfall, hantering av osäkerheter etc.), med hjälp av ett analyschema.
- Ett omfattande system för dokumentation av de beslut som tas vid genomförandet av en säkerhetsanalys.

Andra organisationer, inklusive SKB, har utvecklat egna metoder för säkerhetsanalys. RES-metodiken, som för närvarande tillämpas av SKB för scenarieanalys, påminner mycket om den metodik som utvecklats inom SITE-94, men det finns även viktiga skillnader. Därför förefaller det som om de metoder som utvecklats inom SITE-94 är mycket relevanta verktyg för att granska framtida säkerhetsanalyser från SKB.

Det har inte varit möjligt att testa alla de metoder som utvecklats inom SITE-94. Därför finns det ett antal aspekter som måste följas upp innan metodiken som helhet kan anses vara tillräckligt väl verifierad. Bland dessa aspekter kan nämnas:

- De influensdiagram och analyschema som utvecklats behöver granskas ytterligare. Detta gäller såväl detaljeringsnivå i diagrammen som den viktning som tilldelats de olika kopplingarna mellan processer.
- Det finns behov av att förenkla metoderna och att göra dem mer användarvänliga.
- Ett antal frågeställningar har inte analyserats inom ramen för SITE-94. Detta gäller särskilt andra scenarier än referensfallet och centralscenariot.

18.2 VIKTIGA SÄKERHETSFRÅGOR

Konsekvensanalysen i SITE-94 är visserligen inte komplett men den har ändå belyst ett antal viktiga frågor om säkerheten hos ett djupförvar:

Kapslarnas funktion. Slutgiltiga svar på några viktiga frågor kan ges först när konstruktionen är färdig och fullskaliga prototyper har testats.

Bergets fördröjningsegenskaper. Nyckelparametern för bergets fördröjning av radionuklidtransport är hur stor sprickyta som finns tillgänglig för sorption. Detta är en härledd geologisk parameter, d.v.s. den kan inte mätas direkt. Det kommer att bli allt viktigare att förstå hur sådana parametrar kan relateras till olika modeller för vattenflöde och nuklidtransport och hur de kan härledas från fältdata.

Rumslig variation. Den rumsliga variationen hos grundvattenflödet och geokemin är platsspecifika egenskaper. Den stora variationen gör att det kan finnas platser i berget där utsläpp av radionuklider från deponerade kapslar når biosfären relativt snabbt utan nämnvärd fördröjning. Metoder för att identifiera och utvärdera potentiellt snabba transportvägar måste utvecklas.

Tidsberoende. Biosfären kommer att utsättas för betydande förändringar i ett perspektiv på tusentals år och sådana förändringar kommer att upprepas många gånger under den tidsperiod som beaktats i SITE-94. I ett mycket långt tidsperspektiv kommer också förhållandena i geosfären att förändras. Beräkningarna i SITE-94 visar att t.ex. större klimatförändringar som istider kan påverka slutförvarets funktion. Sådana och andra tidsberoende processer behöver utredas mer i detalj i kommande säkerhetsanalyser.

Buffertens utveckling. Bufferten har en central roll i det totala slutförvarssystemet för att fördröja transporten av radionuklider. Med tanke på detta är förståelsen för hur dess egenskaper kan förändras i långa tidsperspektiv inte tillräcklig.

Det bör noteras att säkerhetsanalysen alltid kommer att innefatta osäkerheter, men att det också kommer att finnas metoder för att minska dem genom forskning och utveckling. Slutligen måste man dock kunna acceptera att det finns vissa kvarstående osäkerheter och kunna analysera deras betydelse genom variationsanalyser. En osäkerhet som har liten betydelse för slutresultatet kan accepteras. Detta innebär att man inte automatiskt måste använda alla möjligheter till forskning och utveckling för att minska osäkerheterna.

18.3 SKIS STÄLLNING EFTER SITE-94

Den metodik som utvecklats inom ramen för SITE-94 liksom den kunskap som vunnits har betydligt ökat SKIs förmåga att bedöma säkerhetsanalyser. Därmed har SITE-94 generellt sett bidragit till de övergripande syftena med SKIs forskningsprogram som dessa formuleras i inledningen till denna rapport. Följande kommentarer kan göras:

- Satsningen på att låta SKIs personal genomföra en omfattande serie beräkningar på frigörelse och transport av radionuklider har varit framgångsrik. Genom arbetet inom SITE-94 har fungerande procedurer utvecklats inom organisationen för att planera, genomföra och dokumentera sådana beräkningar med hög kvalitet och effektivitet. Det är sannolikt att SKI kommer att utnyttja denna kompetens såväl i framtida nya säkerhetsanalysprojekt som vid granskning av SKBs analyser.
- Arbetet att dokumentera projektet i ett format som följer SKIs generella anvisningar till SKB med avseende på innehållet i en säkerhetsanalys har varit svårt. Delvis beror detta på den enorma informationsmängden som måste sammanställas, men framför allt är det ett resultat av att SITE-94 var ett forskningsprojekt, och inte en säkerhetsanalys av ett verkligt fall. Allmänt kan sägas att den information som ges i SITE-94 rapporten är av den typ som bör ingå i en säkerhetsanalysrapport. Detaljeringsgraden är djup i några avsnitt (t.ex. då det gäller hydrogeologi), medan andra avsnitt behandlas relativt översiktligt (exempelvis återfyllning och försegling, gastransport, kolloider och biosfären).
- Vid avslutningen av Projekt-90 konstaterade SKI att de tidigare slutsatserna som dragits av regeringen (efter genomgången av KBS-3) att säker slutförvaring av använt kärnbränsle i Sverige skulle vara genomförbar, fortfarande var att betrakta som korrekta. Det arbete som genomförts inom ramen för SITE-94 har inte identifierat någonting som förändrar denna generella slutsats. SKI anser fortfarande att KBS-3 metoden är ett realistiskt huvudalternativ för SKBs fortsatta forsknings- och utvecklingsarbete. Som framhållits ovan konstaterar emellertid SKI att flera viktiga osäkerheter fortfarande behöver behandlas, såväl med avseende på de tekniska barriärernas långsiktiga funktion som med avseende på geosfärens utveckling. Återkommande säkerhetsanalyser kommer att spela en viktig roll för att styra och integrera framtida forskningsarbete och teknisk utveckling. Det slutliga

provet kommer att bestå i att anpassa den valda metoden till platsspecifika egenskaper och att utveckla en säkerhetsanalys för den valda platsen.

SKI har tagit fram användbara verktyg för säkerhetsanalyser. De måste givetvis hållas under kontinuerlig utveckling och en revision av analys-schemat kommer att identifiera punkter där den redan nu är otillräcklig. Innehållet i SITE-94 rapporten kommer att ge utgångspunkter för att ta fram SKIs föreskrifter om vad som skall ingå i en säkerhetsanalys för en tillståndsansökan.

18.4 FORTSATT FORSKNING OCH UTVECKLING

SKI kommer nu närmast att inrikta sina ansträngningar på några av de specifika frågor som identifierats i avsnitt 18.2 ovan. Kapsel- och buffertegenskaper kommer givetvis att vara viktiga i det framtida arbetet liksom SKBs platsundersökningar.

Den metodik som tagits fram i SITE-94 måste utvecklas ytterligare. Vissa aspekter av SITE-94, gällande geologiska och hydrogeologiska platsmodeller, kommer att kunna testas genom analys av de data som nu finns tillgängliga från tunneln i Äspölaboratoriet.

Under de kommande åren kommer SKI att få i uppdrag att granska säkerhetsanalyser från SKB som en del av deras forsknings- och utvecklingsarbete och platsvalsprogram. SKI kommer därvid att behöva använda de båda huvudkomponenterna i SITE-94; platsutvärdering och övergripande metodik för säkerhetsanalys.

Framtida projekt kommer att bygga på de resultat som beskrivits tidigare i detta kapitel. Framför allt bör följande noteras:

- Även om influensdiagram och analys-schema, med tillhörande databaser, inom SITE-94 inte är kompletta kommer framtida projekt inte att behöva upprepa det tidskrävande arbete som det utgör att ta fram dem. Det framtida arbetet kan i stället inriktas på granskning och uppdatering.
- Om SKI skulle få i uppdrag att granska platsdata liknande dem som analyserats från Äspö skulle det inte vara nödvändigt att genomföra alla de olika typer av analyser som företagits inom SITE-94. Endast ett fåtal olika modeller uppvisar skillnader med avseende på frigörelse och transport av radionuklider, och än färre är känsliga för de mätningar som för närvarande genomförs vid platsundersökningar.
- Grundläggande processer som påverkar kapslarnas egenskaper har identifierats och utvärderats. Framtida granskningar kommer att göras med avseende på olika kapselutföranden, som föreslås av SKB.
- SKI besitter god egen kapacitet för att genomföra oberoende beräkningar på frigörelse och transport av radionuklider.

Med tanke på de betydande granskningsuppgifter som SKI relativt snart kommer att stå inför, kommer SKI i första hand att verka för utveckling av de metoder som använts inom SITE-94, och att stödja målinriktad forskning om olika barriärers egenskaper.

Bilaga 1

ORDFÖRKLARING

Advektion	Transport av t.ex. radionuklider med strömmande grundvatten.
Aktiveringsprodukt	Uppkommer genom neutroninfångning i kapselrör och övriga metalldelar i kärnbränslet, Exempel på aktiveringsprodukter är kobolt-60, nickel-59 och zirkonium-93.
Allmänkorrosion	Korrosion som verkar samtidigt på materialets hela yta.
Analysschema	Visar hur information överförs mellan olika modeller och databaser. Resultaten från en modell ger indata till andra modeller.
Basfallet	Utgångspunkt för konsekvensanalysen i SITE-94. Det är ett beräkningsfall med parametervärden som bedömts som lämpliga som grund för variationer för att utforska betydelsen av osäkerheter.
Bentonit	En typ av lera som utmärks av sin förmåga att ta upp vatten och svälla.
Bergmatris	Berget mellan sprickor.
Bequerel	Antalet sönderfall per sekund av ett radioaktivt ämne; ett mått på mängden av ämnet.
Biosfären	Sammanfattande beteckning för de delar av naturen där liv förekommer. Något oegentligt används termen i säkerhetsanalysen för att beteckna de delar av världen som ligger ovanför berget eller "geosfären".
Bränsleelement	Enhet i hanteringen av kärnbränsle som håller samman bränslestavar. Bränsleelement har olika utformning beroende på reaktortyp, kokarreaktor (BWR) eller tryckvattenreaktor (PWR).
Centralscenario	Ett klimatscenario som innehåller sådana händelser som med stor sannolikhet kan förväntas inträffa. I detta ingår ett antal händelser som orsakats av klimatförändringar som t.ex. permafrost, glaciation och förändringar av havsytans nivå.

CLAB	Centralt lager för använt kärnbränsle, beläget vid Oskarshamns kärnkraftverk.
Diffusion	Spontan transport av ämnen (t.ex. radionuklider) orsakad av molekylära rörelser. Ett exempel på diffusion i säkerhetsanalysen är transport av radionuklider genom bentoniten, som är så tät att där inte finns någon grundvattenrörelse.
Diffusivitet	Anger hur snabbt transport med diffusion sker i ett medium.
Dispersion	Spridning av radionuklider med olika transportmekanismer. Diffusion är en sådan mekanism, men vissa modeller i säkerhetsanalysen räknar också den spridning som sker av radionukliderna, t.ex. på grund av variationer i grundvattenflöde mellan olika sprickor, som dispersion.
Dos	Mått på farlighet hos radioaktiv strålning. Anges ofta i Sievert (Sv).
F-talet	Ett mått på bergets förmåga att begränsa utsläpp av radionuklider till biosfären. Ett lågt F-tal betyder högt grundvattenflöde och liten flödesvätt yta, och därmed liten möjlighet till fördröjning av radionuklidernas transport till biosfären.
FEP	Begreppet kommer från engelskan där det står för "Features, Events and Processes", som kan översättas med Egenskaper, Händelser och Processer. En egenskap hos förvaret kan vara bergets genomsläpplighet för grundvatten. En händelse kan t.ex. vara en jordbävning, medan kopparkapslars korrosion är exempel på en process.
Fissionsprodukt	Bildas genom kärnklyvning av uran och plutonium. Exempel: strontium-90 och cesium-137.
Flödesvätt yta	Kontaktytan mellan det grundvatten som strömmar i bergets sprickor och det omgivande berget. Bergets förmåga att fördröja radionuklider genom sorption och matrisdiffusion beror bl.a. på storleken av den flödesvätta ytan.

Fördröjning	Transporten av radionuklider, t.ex. i berget, fördröjs på grund av olika processer (matrisdiffusion och sorption) jämfört med om nukliderna skulle transporteras med samma hastighet som grundvattnet.
Geosfären	Den del av berget som behöver analyseras med avseende på grundvattenströmning och transport av radioaktiva ämnen. I säkerhetsanalysen räknas vanligen inte den del av berget som tillhör närområdet in i geosfären.
Geokemi	Vetenskapen om de kemiska egenskaperna i berggrunden (bl.a. hos bergmineral, sprickytor och grundvatten).
Halveringstid	Den tid det tar för en viss mängd av en radionuklid att sönderfalla till hälften.
Hydrogeologi	Den del av geologin som sysslar med förutsättningarna för grundvattnets egenskaper och rörelser i berggrunden.
Influensdiagram	Visar i grafisk form hur olika FEPs hänger samman och påverkar varandra.
K_d -värde	Mått på ett ämnes sorptionsförmåga. Det definieras som förhållandet mellan ett ämnes koncentration i fast fas och dess koncentration i lösning.
Kongruent upplösning	Frigörelse av nuklider i kärnbränslet i samma takt som uranmatrisen upplöses.
Konsekvensanalys	Beräknar radioaktiva utsläpp till biosfären och doser under olika antaganden. I konsekvensanalysen genomförs beräkningar av radioaktiva ämnens frigörelse från bränslet och deras transport genom tekniska barriärer och geosfär.
Korngränsfrigörelse	En typ av frigörelse av vissa radionuklider som sitter i korngränserna i bränslet. Korngränsfrigörelse antas ske snabbare än kongruent upplösning men långsammare än spaltfrigörelse.
Kriticitet	Tillstånd hos kärnbränsle då det kan upprätthålla en kedjereaktion av kärnklyvningar.

Lokal korrosion	Korrosion som begränsas till en liten del av materialytan, och som ofta verkar snabbare än allmänkorrosion.
Matrisdiffusion	Innebär att nukliderna från en spricka där vattnet rör sig diffunderar in i bergets mikrosprickor.
Modell	Arbetsverktyg i säkerhetsanalysen som på ett väldefinierat sätt, ofta genom matematiska ekvationer, omvandlar information av ett visst slag (indata) till ny information (utdata).
Modellosäkerhet	Innebär att de modeller som används för utvärdering av scenarierna inte beskriver systemet på ett korrekt sätt.
Nuklid	Atomslag karakteriserat av atomkärnans sammansättning. Ett grundämne kan ha olika nuklider. Plutonium-239 och plutonium-240 är således två olika nuklider av grundämnet plutonium. Nuklider av samma grundämne benämns också isotop. Begreppet nuklid är dock mer generellt.
Närområdet	Det använda bränslet, tekniska barriärer i djupförvaret samt de delar av berget som direkt kan påverkas av förvaret.
Oförstörande provning	Provning som inte påverkar det provade materialet. För oförstörande provning av kopparkapslar övervägs två metoder: ultraljudsprovning och radiografi.
Osäkerhet	“Brist på kunskap” eller “ovisshet”. Indelas i systemosäkerhet, scenario-osäkerhet, modellosäkerhet och parameterosäkerhet.
Oxiderande förhållanden	Syrehaltigt vatten.
Parameterosäkerhet	Osäkerhet i värdet på enskilda parametrar som finns i modellerna.
Peclets tal	Dimensionslös parameter som anger förhållandet mellan transport av lösta ämnen med advektion och diffusion. I de förenklade transportmodeller som används inom säkerhetsanalysen kan Peclets tal även sägas beskriva förhållandet mellan transport av lösta ämnen som sker med vattnets medelhastighet och olika typer av spridningsmekanismer (dispersion).

Permafrost	Mark som är frusen året runt.
Porositet	Mått på håligheten hos ett material. Porositeten definieras som hålrummens volym per volymenhet av hela materialet.
Processystem	De FEPs som ingår i det analyserade systemet. Processystemet innehåller FEPs för tekniska barriärer och geosfär inklusive transport av radioaktiva ämnen.
Radiolys	Innebär här att strålning (främst alfastrålning) från kärnbränslet sönderdelar vatten i dess beståndsdelar, d.v.s. väte och syre.
Radionuklid	Synonymt med "radioaktiv nuklid". (Det finns alltså stabila nuklider).
Recipient	Den del av biosfären (t.ex. brunn, insjö eller mosse) som tar emot radioaktiva ämnen från geosfären.
Reducerande förhållanden	Syrefri miljö.
Redoxfront	Gränsyta mellan syrehaltig och syrefri miljö.
Redoxförhållanden	Sammanfattande beteckning på syrehalten, med andra ord om oxiderande eller reducerande förhållanden råder.
Referensfallet	Utgår från att processystemet utvecklas med tiden utan yttre händelser. I referensfallet antas således att biosfären inte förändras, t .ex. genom klimatförändringar.
Resteffekt	Värme som produceras i bränslet efter det att det tagits ut ur reaktorn. Uppstår på grund av energiproduktion vid radionuklidernas sönderfall.
Scenarier	Representerar olika möjliga framtida händelseförlopp.
Scenario-osäkerhet	Beror på att man inte kan veta om man beaktat alla yttre händelser av betydelse, eller kombinationer av dessa.
Sorption (av radionuklider)	Olika nuklider har olika benägenhet att fastna (sorbera) på sprickytorna då de transporteras med grundvattnet i bergets sprickor (motsvarande process sker även i bentonitleran).

Spaltfrigörelse	Gäller den andel av radionukliderna som finns i spalten mellan urankuts och det material som kapslar in bränslestavarna. Spaltfrigörelsen antas ske snabbt då inkapslingen har genombrutits.
Sprickmineral	Mineral som belägger ytan på en spricka i berget. Kalcit, klorit och hematit är vanliga sprickmineral.
Sprickzon	Delar av berget med förhöjd sprickighet.
Spårämne	Ämne som finns i så låg koncentration att omgivningen inte påverkas av dess förekomst.
Spårämnesförsök	I kärnavfallssammanhang: Försök med ett spårämne, t.ex. med avsikt att se hur ämnet fördröjs i berget på grund av sorption och matrisdiffusion.
Strukturgeologisk modell	En "bild" av berget som visar dess sprickstruktur.
Subhorisontell zon	Svagt sluttande sprickzon.
Systemosäkerhet	Beror på att man inte kan vara säker på att alla relevanta FEPs och kopplingar dem emellan har tagits med i analysen.
Termodynamiska data	Här: Data om kemiska reaktioner och deras beroende av temperatur, tryck och koncentration.
Transuraner	Grundämnen som är tyngre än uran. Exempel på transuraner är neptunium, plutonium, americium och curium.
Yttre händelser	FEPs som ligger utanför processsystemet. Yttre händelser och förhållanden ger upphov till scenarier för systemets framtida utveckling.
Överföringsfaktorer	Anger hur ett beräknat inflöde till biosfären av radioaktiva ämnen skall omräknas till dos.

Bilaga 2

SITE-94 UNDERLAGSRAPPORTER

SKI Teknisk Rapport

- 93:23 Site characterization in fractured crystalline rock, A critical review of geohydraulic measurement methods
Andersson, P., Andersson, J-E., Gustafsson, E., Nordqvist, R., and Voss, C.
- 93:25 Initial two dimensional groundwater flow calculations for SITE-94
Boghammar, A., and Grundfelt, B.
- 93:27 Scenario development FEP audit list preparation: Methodology and presentation
Stenhouse, M., Chapman, N., and Sumerling, T.

SKI Rapport

- 94:6 Korrosion av kopparmaterial för inkapsling av radioaktivt avfall - En litteraturstudie
Engman, U., and Hermansson, H-P.
- 95:12 User guide for CALIBRE, version 2
Worgan, K., and Robinson, P.
- 95:13 The CALIBRE source-term code: Technical documentation for version 2
Worgan, K., and Robinson, P.
- 95:26 Systems analysis, scenario construction and consequence analysis definition for SITE-94
Chapman, N., Andersson, J., Robinson, P., Skagius, K., Wene, C-O., Wiborgh, M., and Wingefors, S.
- 95:29 Some properties of copper and selected heavy metal sulfides, a limited literature review
Hermansson, H-P.
- 95:30 On the specific surface area parameter: a sensitivity study with a Discrete Fracture network model
Nordqvist, W., Dverstorp, B., and Andersson, J.
- 95:40 Far-field rock mechanics modelling for nuclear waste disposal
Hansson, H., Stephansson, O., and Shen, B.

- 95:41 Rock mechanics modelling for the stability and safety of a nuclear waste repository. Executive summary
Hansson, H., Shen, B., Stephansson, O., and Jing, L.
- 95:42 The Central Scenario for SITE-94
King-Clayton, L., Chapman, N., Kautsky, F., Svensson, N-O., de Marsily, G., Ledoux E.
- 95:44 The SKN conceptual model of Äspö
Sundquist, U., and Torssander, P.
- 95:55 The CRYSTAL geosphere transport model: Technical documentation, version 2.1
Worgan, K., and Robinson, P.
- 95:56 User guide for CRYSTAL, version 2.1
Worgan, K.
- 95:73 Revised Pourbaix diagrams for copper at 5-150 °C
Beverkog, B., and Puigdomenech, I.
- 96:2 Chemical and physical transport parameters for SITE-94
Andersson, K.
- 96:4 Generalized radial flow interpretation of well tests for the SITE-94 project
Geier, J.E., Doe, T.W., Benabderrahman A., and Hässler, L.
- 96:5 Discrete-feature modelling of the Äspö site: 1. Discrete-fracture network models for the repository scale
Geier, J.E., and Thomas, A.L.
- 96:6 Discrete-feature modelling of the Äspö site: 2. Development of the integrated site-scale model
Geier, J.E.
- 96:7 Discrete-feature modelling of the Äspö site: 3. Predictions of hydrogeological parameters for performance assessment
Geier, J.E.
- 96:8 Discrete-feature modelling of the Äspö site: 4. Source data and detailed analysis procedures
Geier, J.E.
- 96:9 Stochastic Continuum hydrological model of Äspö
Tsang, Y.W.

- 96:10 Site-specific base data for the performance assessment
Geier, J.E., Tirén, S., Dverstorp, B., and Glynn, P.
- 96:11 Glaciation and regional ground-water flow in the Fennoscandian shield
Provost, A., Voss, C., and Neuzil, C.
- 96:12 Transport sensitivity studies for SITE-94: Time-dependent site-scale modelling
of future glacial impact
King-Clayton, L., and Smith, P.
- 96:13 Hydrogeology of Äspö Island, Simpevarp, Sweden
Voss, C., Tirén, S., and Glynn, P.
- 96:14 Simple evaluation of groundwater flux and radionuclide transport at Äspö
Dverstorp, B., Geier, J., and Voss, C.
- 96:15 Preliminary analysis of geostatistical structure of Äspö borehole data
Le Loc'h, G. and Osland, R.
- 96:16 Development of a geological and structural model of Äspö, southeastern Sweden
Tirén, S., Beckholmen, M., Voss, C., and Askling, P.
- 96:17 Near-field rock mechanical modelling for nuclear waste disposal
Shen, B., and Stephansson, O.
- 96:18 Modelling of rock fracture propagation for nuclear waste disposal
Shen, B., and Stephansson, O.
- 96:19 Comparison of the SKI, SKB and SKN geological and structural models of the
Äspö area
Tirén, S.
- 96:29 Geochemical characterization of Simpevarp ground waters near the Äspö Hard
Rock Laboratory
Glynn, P., and Voss, C.
- 96:30 Radionuclide solubilities for SITE-94
Arthur, R., and Apted, M.
- 96:31 Modelling of near-field chemistry for SITE-94
Arthur, R., and Apted, M.
- 96:32 Modelling of groundwater chemistry at Äspö Hard Rock Laboratory
Emrén, A.
- 96:33 Mineralogy at the Äspö site
Andersson, K.

- 96:34 Adaption of mechanistic sorption models for performance assessment calculations
Arthur, R.
- 96:35 Estimated rates of redox-front migration in granitic rocks
Arthur, R.
- 96:46 CAMEO: A model of mass-transport limited general corrosion of copper canisters
Worgan, K., and Apte, M.
- 96:55 Korrosionsscenarier för koppar-järnkapseln vid slutförvar av använt kärnbränsle
Beverskog, B.
- 96:62 A biosphere model for use in SITE-94
Barrdahl, R.
- 97:5 SKI SITE-94, Deep repository performance assessment project, Summary