

**R-00-28**

# **Förvarsalternativet djupa borrhål**

**Innehåll och omfattning av  
FUD-program som krävs för  
jämförelse med KBS-3-metoden**

Svensk Kärnbränslehantering AB

Augusti 2000

**Svensk Kärnbränslehantering AB**

Swedish Nuclear Fuel  
and Waste Management Co

Box 5864

SE-102 40 Stockholm Sweden

Tel 08-459 84 00

+46 8 459 84 00

Fax 08-661 57 19

+46 8 661 57 19



# **Förvarsalternativet djupa borrhål**

## **Innehåll och omfattning av FUD-program som krävs för jämförelse med KBS-3-metoden**

Svensk Kärnbränslehantering AB

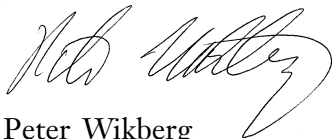
Augusti 2000

# Förord

Arbetet med denna rapport initierades i januari 2000 efter det att regeringen i sitt beslut om det samlade underlag som SKB ska redovisa inför valet av platser för platsundersökningar ålade SKB att belysa alternativet djupa borrhål ”med inriktning på omfattning och innehåll i det forsknings- och utvecklingsprogram som behövs för att denna metod skall kunna jämföras med den så kallade KBS-3-metoden på likvärdiga grunder”.

Projektet har genomförts av en grupp bestående av:

- Olle Broman, Ekonomisk Byggnation AB
- Lars O Ericsson, Chalmers Tekniska Högskola
- Robert Havel, SKB
- Allan Hedin, SKB
- Christopher Juhlin, Uppsala Universitet
- Berit Lundqvist, SKB
- Patrik Sellin, SKB
- John Smellie, Conterra AB
- Kastriot Spahiu, SKB
- Christer Svemar, SKB
- Thomas Wallroth, Bergab
- Lars Werme, SKB
- Marika Westman, SKB
- Peter Wikberg, SKB



Peter Wikberg  
Projektledare  
Säkerhet och vetenskap, SKB

# Innehållsförteckning

<b>Sammanfattning</b>	7
<b>1 Bakgrund</b>	11
1.1 Forskningsprogrammets syfte	11
1.2 Vilka krav finns på ett förvar för använt kärnbränsle?	11
1.3 Förvarskonceptet djupa borrhål	12
1.4 Vad innebär konceptet djupa borrhål jämfört med KBS-3-konceptet?	16
1.5 FUD-programmets innehåll och struktur	17
<b>2 Geovetenskap</b>	19
2.1 Förhållanden på stora djup	19
2.1.1 Termiska processer	19
2.1.2 Hydrauliska processer	20
2.1.3 Mekaniska processer	22
2.1.4 Kemiska processer	25
2.1.5 En geovetenskaplig modell ner till 5 000 meters djup	27
2.2 Geovetenskaplig forskning	28
2.2.1 Grundläggande principer för förvarskonceptet	28
2.2.2 Program för forskning, utveckling och demonstration	30
2.2.3 Geologi	31
2.2.4 Termiska processer	33
2.2.5 Hydrauliska processer	34
2.2.6 Mekaniska processer	35
2.2.7 Kemiska processer	36
2.2.8 Transport i geosfären	38
2.2.9 Stegvis FUD-program	39
<b>3 Teknik</b>	47
3.1 Inkapsling av använt bränsle	47
3.1.1 Inkapslingsanläggning	47
3.1.2 Återtag av bränsle	48
3.2 Borrning	49
3.2.1 Stabilisering av borrhål	50
3.2.2 Borrteknisk utveckling	51
3.3 Deponering	52
3.3.1 Deponeringsslurry – konsistens och processer	52
3.3.2 Applicering av deponeringsslurry	53
3.3.3 Applicering av kapslar och bentonitblock	53
3.3.4 Radiologiska frågor vid deponering	54
3.4 Försegling	55
3.5 Återtag av kapsel	55

<b>4</b>	<b>Tekniska barriärer</b>	57
4.1	Bränslet	57
4.1.1	Strårelaterade processer	57
4.1.2	FoU-program för bränsle	58
4.2	Kapseln	59
4.2.1	Säkerheten i djupförvaret	60
4.2.2	Säkerheten vid drift	61
4.2.3	Konstruktionsförutsättningar	61
4.2.4	Forsknings- och utvecklingsprogram för kapselutformning	62
4.2.5	Utvecklingsprogram för kapseltillverkning	63
4.2.6	Serieproduktion	64
4.3	Buffert	64
4.3.1	Strårelaterade processer	65
4.3.2	Termiska processer	65
4.3.3	Hydrauliska processer	65
4.3.4	Mekaniska processer	65
4.3.5	Kemiska processer	66
4.3.6	Tidsplan	66
4.4	Radionuklidtransport	67
<b>5</b>	<b>Säkerhetsanalys</b>	69
5.1	Säkerhetsprinciper	69
5.2	Metodik	69
5.3	Program för säkerhetsanalys	70
5.4	Genomförande	71
<b>6</b>	<b>Tidsplaner och kostnader för FUD-programmet djupa borrhål</b>	73
<b>7</b>	<b>Slutsatser</b>	75
<b>Bilaga</b>		79

# Sammanfattning

FUD-program för deponering i djupa borrhål:

- Teknik för borrning och deponering finns inte idag.
- Att öka kunskapen om djupa borrhål till en sådan nivå att metoden kan jämföras med KBS-3-metoden skulle ta mer än 30 år och kosta drygt 4 miljarder kronor.

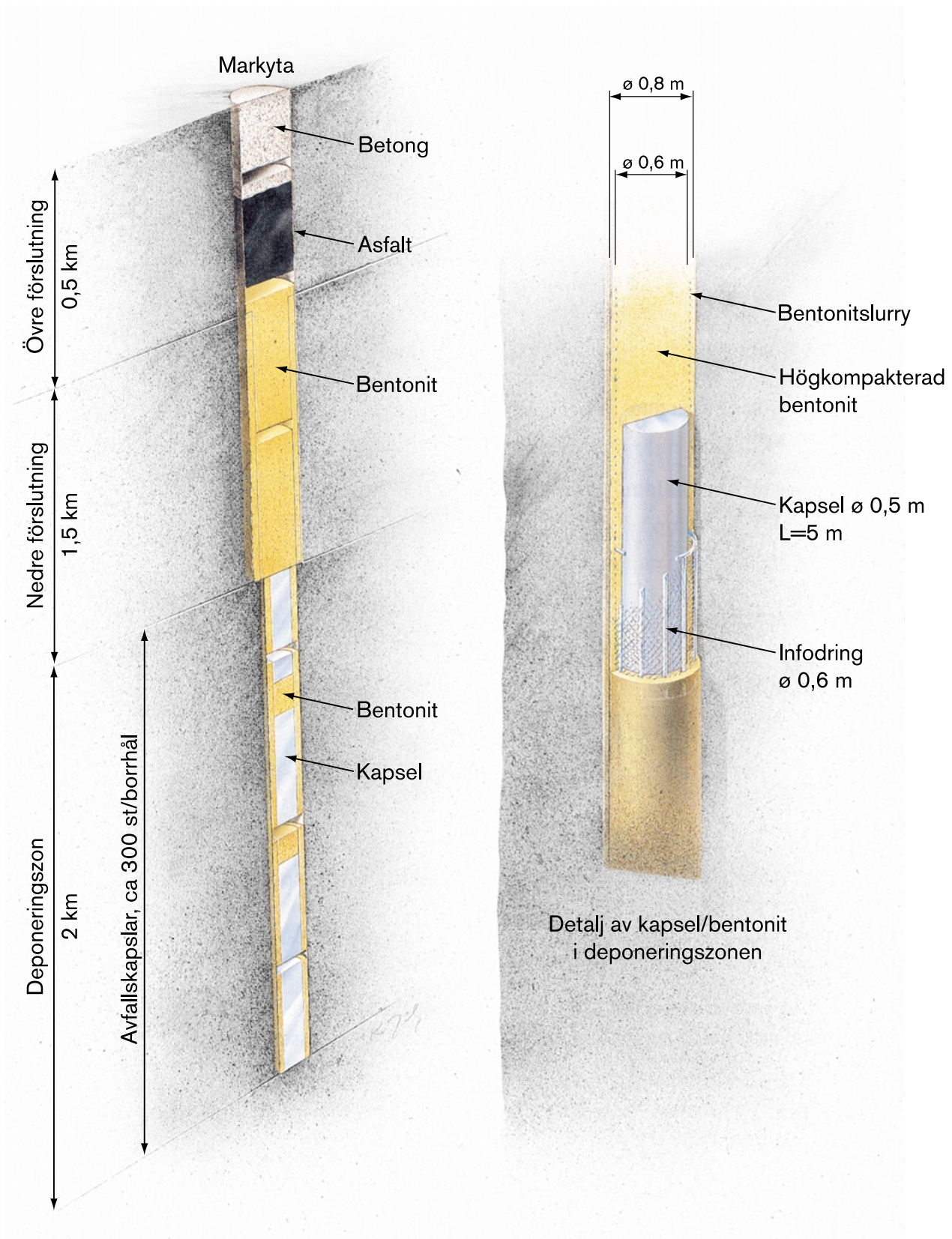
Denna rapport redovisar vilken forskning, utveckling och demonstration som skulle krävas för att förvarskonceptet djupa borrhål på likvärdiga grunder ska kunna jämföras med KBS-3. Konceptet har diskuterats i en rad sammanhang under årens lopp. Bland annat har remissinstanserna för SKB:s FUD-program vid ett flertal tillfällen under det senaste decenniet pekat på vikten av att bibehålla en hög kunskapsnivå även när det gäller denna metod, se Bilaga 1. I regeringens beslut om det samlade underlag som SKB ska redovisa inför valet av platser för platsundersökningar /1/, efterfrågades en belysning med inriktning på omfattning och innehåll i de forsknings- och utvecklingsinsatser som skulle krävas för en utveckling av djupa borrhål till samma tekniska nivå som dagens KBS-3.

Förvarskonceptet djupa borrhål har tidigare utretts i PASS-projektet, Projekt Alternativ-Studier för Slutförvar /2/. I PASS-rapporten analyserades och jämfördes alternativen KBS-3, medellånga tunnlar, långa tunnlar och djupa borrhål. Figur 1 visar principen för förvaring i djupa borrhål.

I djupa borrhål är det berget som utgör den viktigaste barriären för att isolera avfallet och förhindra spridning av radioaktiva ämnen till biosfären. På två till fyra kilometers djup antas grundvattenförhållandena vara mycket stabila. De eventuella grundvattenrörelser som förekommer förväntas ske på stort djup utan kontakt med markytan och därmed utan möjlighet att transportera radionuklider upp till markytan. Detta återstår dock att visa i en säkerhetsanalys.

Även om den väsentliga långsiktiga säkerheten i konceptet ligger i bergets funktion så finns det andra barriärer. Kapseln ska konstrueras för att motstå den mekaniska påverkan som uppstår på fyra kilometers djup. Bufferten har till främsta uppgift att fixera kapslarna i sina lägen efter deponeringen. Liksom vid KBS-3 utnyttjas flera barriärfunktioner, men betoningen på barriärerna är olika. I KBS-3 är ingenjörbarriärerna, kapseln och bufferten, garanterna för isoleringen i samverkan med berggrunden. I djupa borrhål är det i första hand berggrunden som garanterar att spridningen av nuklider inte når markytan. Liksom på 500 meters djup finns det på 4 000 meters djup grundvatten. Detta har dock betydligt högre salthalt och lägre rörlighet.

I KBS-3-konceptet kommer funktionerna isolering i intakta kapslar över mycket lång tid och fördröjning av eventuellt nuklidläckage att ha betydelse då den långsiktiga säkerheten analyseras. I djupa borrhål kommer kapseln att ha en mycket kortare livslängd. Det får som konsekvens att endast funktionen fördröjning av nuklidläckage kommer att ha betydelse i en säkerhetsanalys.



Figur 1. Förvaring i djupa borrhål

Att lokalisera ett lämpligt område för deponering i djupa borrhål är med dagens kunskap förenat med större osäkerheter än motsvarande lokalisering av ett KBS-3-förvar. Emellertid är principen likartad: Utifrån berggrundskartor väljs en potentiellt lämplig plats, vars lämplighet måste bekräftas med borrhning. Skillnaden är att KBS-3-förvaret lättare kan anpassas till berggrunden, så att deponeringshålen redan från början kan borraras på lämpliga platser. För djupa borrhål måste den miljö som deponeringshålet påträffar accepteras eller förkastas som helhet.

Miljöpåverkan ovan jord vid deponering i djupa hål blir större än vid deponering i ett djupförvar av KBS-3-typ. Detta får konsekvenser på MKB-arbetet. De aktiviteter som behövs för att ta fram ett MKB-dokument behandlas emellertid inte i programförslaget.

Programmet innehåller fem huvuddelar:

- Kunskapsläge och forskningsprogram för geovetenskap
- Kunskapsläge, forsknings-, utvecklings- och demonstrationsprogram för teknikfrågor.
- Kunskapsläge och forskningsprogram för tekniska barriärer
- Kunskapsläge och utvecklingsprogram för säkerhetsanalys
- Tidsplaner och kostnader

De geovetenskapliga insatserna styr tidsåtgången för utvecklingen av konceptet. Utveckling av borrhningsteknik kan innehålla stora osäkerheter och skulle kunna förlänga totaltiden ytterligare.

Kostnader har uppskattats för de enskilda aktiviteterna som ingår i beskrivningen om kunskapsläge samt forsknings- och utvecklingsbehov för de olika ämnesområdena. På samma sätt som med tidsplanerna måste kostnadsangivelserna betraktas som minimikostnader under förutsättning att aktiviteterna kan genomföras enligt tidsplanerna.

Att utveckla deponeringskonceptet djupa borrhål till en kunskapsnivå motsvarande den vi idag har för KBS-3-konceptet beräknas ta mer än 30 år och kosta drygt 4 miljarder kronor.

Analysen av behovet av forskning, utveckling och demonstration utgår från det system som definierades i PASS-rapporten. I en framtida, mer djupgående analys av konceptet djupa borrhål bör pragmatiska synpunkter vägas in ännu starkare än i tidigare utredningar. Ett naturligt första steg är att optimera konceptet med avseende på borrhningsteknik och val av material och teknik för deponering.

I ett andra steg inventeras möjliga alternativa utformningar av konceptet. En mer radikal, tänkbar variant av konceptet är att ändra hålets djup. Analys av en sådan alternativ utformning av konceptet förutsätter emellertid att man säkrare måste kunna värdera de hydrauliska förhållandena i berget och transmissiviteten hos diskreta strömningsvägar som funktion av djupet med beaktande av grundvattenkemin. Slutligen måste valet av buffertmaterial granskas. Eftersom buffertens huvudsakliga uppgift är att hålla kapslarna på plats är det inte självklart att bentonit är det bästa valet i djupa borrhål.



## Referenser

- /1/ Regeringsbeslut Program för forskning, utveckling och demonstration för kärnavfallens behandling och slutförvaring, FUD-program 98, d.nr. M1999/2152/Mk, M1999/3040/Mk.
- /2/ SKB Projekt AlternativStudier för Slutförvar (PASS), Svensk Kärnbränslehantering AB, 1992.

# 1 Bakgrund

## 1.1 Forskningsprogrammets syfte

Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) har under drygt 20 år utvecklat den metod som kallas KBS-3. KBS-3 är det svenska huvudalternativet för att slutförvara använt kärnbränsle i ett geologiskt djupförvar. I korthet går metoden ut på att det använda bränslet ska kapslas in i koppar och bäddas in i bentonitlera på ungefär 500 meters djup i urberget.

Parallellt med KBS-3-metoden har SKB även utrett andra alternativ. Ett av dessa är konceptet djupa borrhål. Metoden studerades och redovisades i en rapport /1-1/ för snart tio år sedan. Den innebär att man borrar ungefär fyra kilometer djupa borrhål i berggrunden. Hålen fylls från botten upp till omkring två kilometers djup med kapslar med använt kärnbränsle och en omgivande buffert. De översta två kilometrarna i hålet pluggas därefter igen.

Djupa borrhål har diskuterats i en rad sammanhang under årens lopp. Bland annat har remissinstanserna för SKB:s FUD-program vid ett flertal tillfällen under det senaste decenniet påpekat vikten av att bibehålla en hög kunskapsnivå även när det gäller denna metod, se Bilaga 1.

Djupa borrhål behandlades även i regeringens beslut om det samlade underlag som SKB ska redovisa inför valet av platser för platsundersökningar /1-2/: ”Vidare skall alternativet djupa borrhål (slutförvaring i borrhål på flera kilometers djup) belysas med inriktning på omfattning och innehåll i det forsknings- och utvecklingsprogram som behövs för att denna metod skall kunna jämföras med den s k KBS-3-metoden på likvärdiga grunder.”

Denna rapport redovisar inriktningen och innehållet i ett sådant program. SKB har inte för avsikt att genomföra programmet. Därtill är omfattningen för stor och möjligheterna att få fram ett alternativ, som uppvisar uppenbara fördelar vad gäller säkerhet eller kostnader, är tveksamma. Ytterligare motiv för detta finns i kompletteringen till FUD-program 98 /1-3/. Däremot kommer vi även i fortsättningen att följa teknikutvecklingen för att borra flera kilometer djupa borrhål samt ta del av de geovetenskapliga resultat som sådana borrhåll resulterar i /1-4/.

## 1.2 Vilka krav finns på ett förvar för använt kärnbränsle?

Kraven på ett förvar för använt kärnbränsle regleras i lag. De viktigaste lagarna i detta sammanhang är miljöbalken /1-5/, kärntekniklagen /1-6/ och strålskyddslagen /1-7/. För att få bygga ett geologiskt förvar krävs tillstånd enligt både miljöbalken och kärntekniklagen.

Miljöbalken reglerar bland annat frågor om tillåtlighetsprövningen vid lokaliseringen av ett geologiskt förvar och hur miljökonsekvensbeskrivningen ska upprättas. Balken reglerar också vilken miljöpåverkan (förutom från joniserande strålning) som kan tillåtas från anläggningen.

Kraven på säkerhet och strålskydd utgår från kärnteknik- och strålskyddslagen. Kärntekniklagen stadgar allmänt att kärnteknisk verksamhet ska bedrivas på ett säkert sätt. Strålskyddslagen föreskriver att den som bedriver verksamhet med strålning ska, med hänsyn till verksamhetens art och de förhållanden under vilka den bedrivs, vidta erforderliga åtgärder och försiktighetsmått för att hindra skador på människor, djur och miljö.

Till kärntekniklagen och strålskyddslagen finns av regeringen utfärdade förordningar som innebär en viss detaljering och reglerar SKI:s och SSI:s verksamheter. De är dock mycket allmänt hållna beträffande krav på djupförvarets säkerhet och strålskydd.

Utöver de ovan nämnda lagarna har SKI och SSI rätt att utfärda föreskrifter.

SSI har utfärdat föreskrifter om slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle /1-8/. Föreskrifterna anger att det slutliga omhändertagandet av använt kärnbränsle ska vara strålskyddsmässigt optimerat och utgå från bästa tillgängliga teknik. Ett slutförvar ska utformas på ett sådant sätt att den årliga risken för skadeverkningar efter förslutning blir högst  $10^{-6}$  för en representativ individ i den grupp som utsätts för den största risken. Dessutom ska ett slutligt omhändertagande genomföras så att den biologiska mångfalden bevaras och de biologiska resurserna utnyttjas på ett hållbart sätt samt skyddas mot strålning.

SKI har skickat ut förslag till föreskrifter om säkerhet vid slutförvaring av använt kärnbränsle /1-9/. Där framhålls att säkerheten, både på lång och på kort sikt, ska baseras på ett system av passiva barriärer och att en brist som kan uppkomma i en av barriärerna inte påtagligt får försämra slutförvarets säkerhet. I förslaget sägs vidare att förhållanden, händelser och processer som har betydelse för säkerheten hos ett djupförvar efter förslutning ska analyseras innan slutförvaret uppförs, innan det tas i drift och innan det försluts.

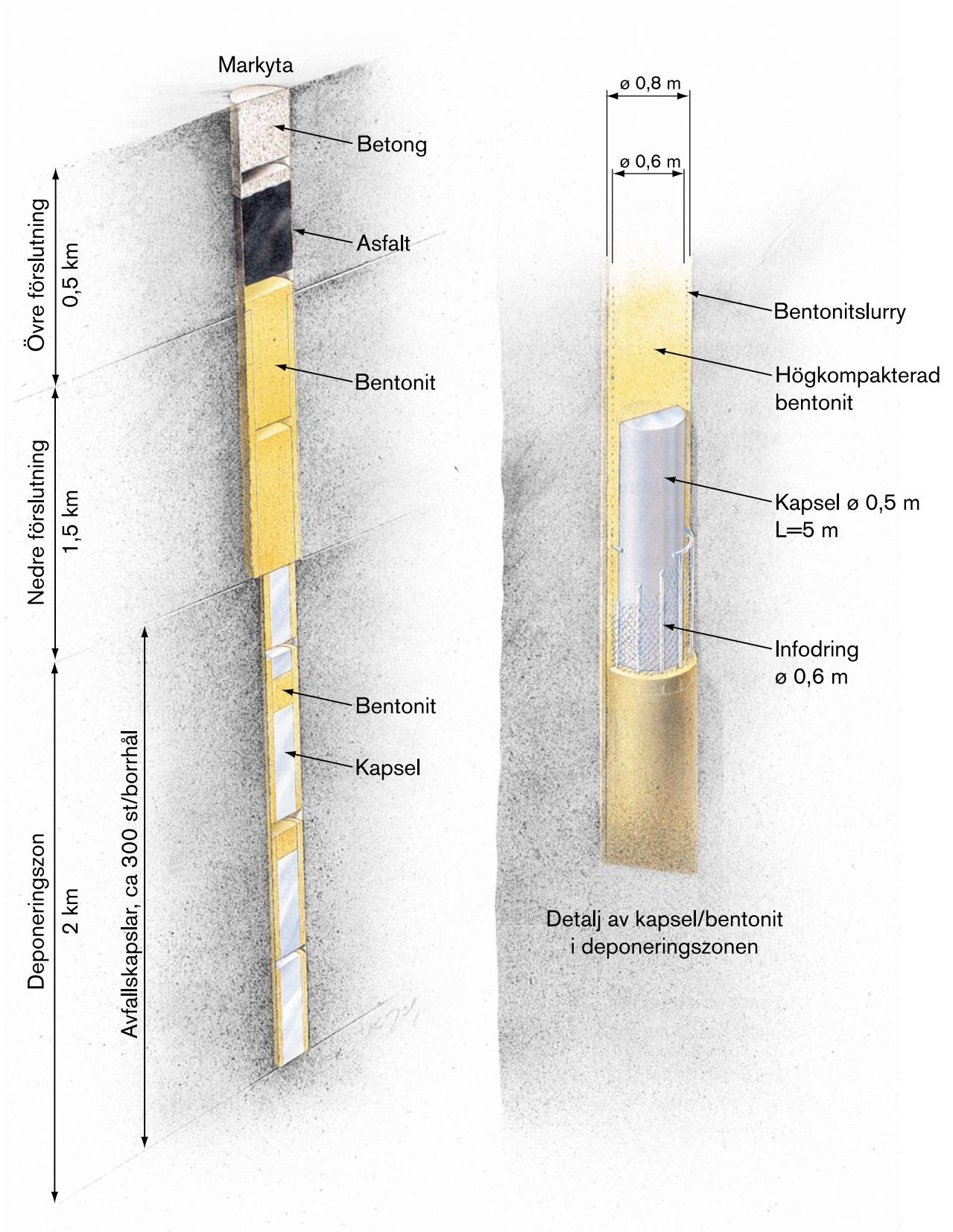
Om de grundläggande kraven är uppfyllda på en specifik plats eller inte prövas i samband med att myndigheterna granskar de säkerhetsanalyser och miljökonsekvensbeskrivningar som SKB är skyldig att redovisa.

Kraven i den svenska lagstiftningen utgår från den internationella överenskommelse Joint Convention on Spent Nuclear Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management som Sverige har ratificerat. Denna har dock inte börjat gälla ännu, eftersom inte tillräckligt många länder har ratificerat den.

### **1.3 Förvarskonceptet djupa borrhål**

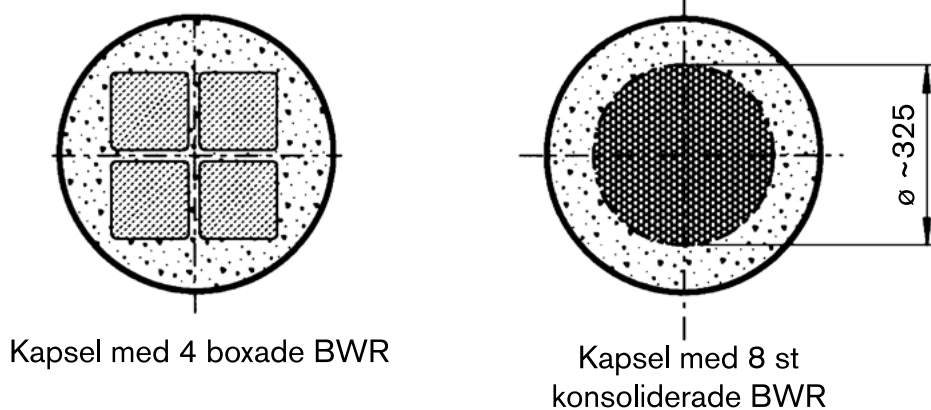
Förvarskonceptet djupa borrhål har utretts i PASS-projektet, Projekt AlternativStudier för Slutförvar /1-1/. I PASS-rapporten analyseras och jämförs alternativen KBS-3, medellånga tunnlar, långa tunnlar och djupa borrhål. Figur 1-1 visar principen för förvaring i djupa borrhål.

Förvarssystemet djupa borrhål omfattar två olika kapselalternativ; en titankapsel med betongfyllning och en kopparkapsel framställd med het isostatisk pressning (HIP). Det använda bränslet kapslas in antingen som hela element eller i konsoliderad form genom att bränslestavarna plockas ut ur bränsleelementet och placeras tätt tillsammans i kapseln. Mellan och kring kapslarna apteras en buffert som gör att kapslarna fixeras i sina lägen i borrhålet. En principskiss av en titankapsel med betongfyllning visas i figur 1-2.



Figur 1-1. Förvaring i djupa borrhål enligt PASS /1-1/.

### Sektion av kapslar



*Figur 1-2. Titankapsel med betongfyllning.*

Sedan PASS-projektet genomfördes har kunskapen om olika processers betydelse för säkerheten i ett förvar ökat. Det finns därför anledning att studera fler kapselalternativ, se närmare avsnitt 4.2.

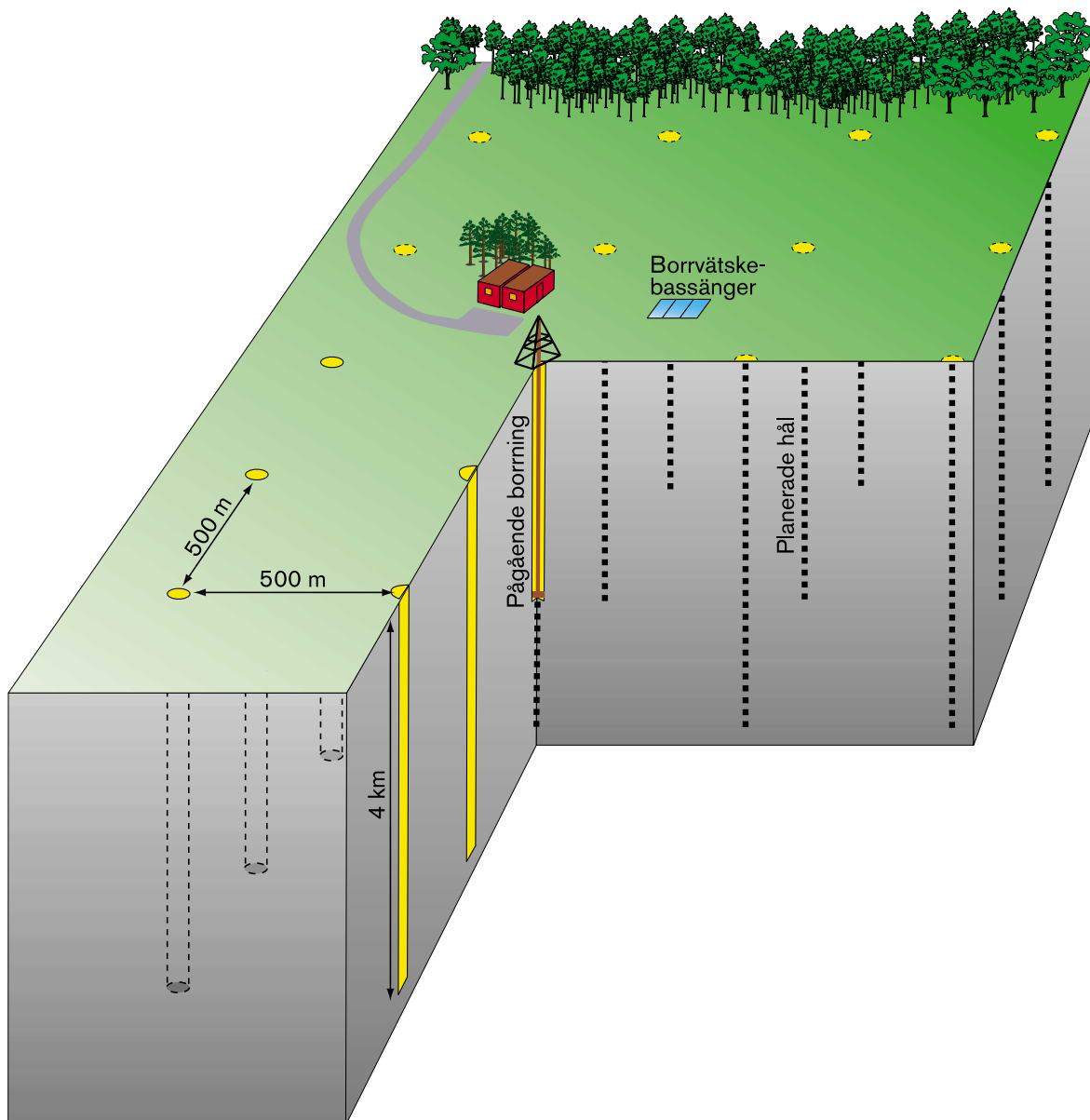
På markytan kommer det att behövas en borrhåls kring varje borrhål. Denna yta behöver planas av och ställas i ordning för vart och ett av deponeringshålen. Antalet hål uppgår till mellan 20 och 40 stycken, beroende på om bränslet är konsoliderat eller inte. Det nödvändiga avståndet mellan borrhålen bestämdes till cirka 500 meter. Då är hänsyn tagen till att borrhålen avviker i vertikalled och att de olika hålen inte ska påverka varandra termiskt när de är fyllda med bränsle. Den totala ytan som tas i anspråk är ungefär 10 km<sup>2</sup>. Figur 1-3 visar hur en förvarsplats med djupa borrhål skulle kunna se ut. Möjligen skulle avståndet mellan de olika borrhålen kunna minska något, eftersom det idag är möjligt att borra rakare än vad man kunde anta för tio år sedan.

Efter genomförd deponering ska borrhålsplatserna återställas till den användning de hade innan borrhållningen inleddes.

Kapseltillverkning, inkapsling och transport till förvarsplatsen kan genomföras på liknande sätt som för ett KBS-3-förvar. Det finns inget krav på att inkapslingen måste göras på plats, men heller inte något som utesluter detta. Transporterna av de tomma eller fyllda kapslarna kan ske på samma sätt som för KBS-3-alternativet. Förmodligen blir hanteringen något enklare, eftersom kapslarna är mindre och lättare. Antalet kapslar ökar dock till minst det dubbla.

Deponeringshålen dimensioneras utifrån vad som är praktiskt och tekniskt möjligt. Styrande har varit det faktum att det anses tekniskt möjligt att borra hål med 800 millimeters diameter till fyra kilometers djup. Men det är inte endast håldiametern som avgör hur mycket bränsle som kan placeras i varje hål. Valet av kapselmateriale och kraven på kapselns mekaniska och kemiska hållfasthet bestämmer tillsammans med dimensionen på bränsleelementen kapseldimensionen. I de ovan nämnda hålen kan kapslar med en ytterdiameter av 500 millimeter placeras /1-1/.

Buffertens uppgift är att fixera kapslarna i sina lägen i deponeringshålet. Valet av buffertmaterial är en funktions- och optimeringsfråga. Initialt utgår man i PASS-projektet från att applicera en bentonitlurry med hög täthet i borrhålet. Vid deponeringen trycks kapslarna ner i borrhålet till det djup där de ska placeras. Kring kapseln finns ett skikt



**Figur 1-3.** Förvarsplats med djupa borrhål.

av högkompakterad bentonit som ska svälla och ta upp vatten ur bentonitslurrin i hålet. På så sätt ökar också slurryns täthet genom att en homogen vattenaktivitet erhålls. Beroende på vilka kemiska förhållanden som kan tänkas råda, kan det finnas anledning att utreda andra buffertmaterial än bentonit. Bentonit måste ha mycket hög täthet för att dess svällningsförmåga inte ska minska påtagligt vid höga salthalter.

Djupa hål har i princip samma (passiva) barriärer som ett KBS-3-förvar. Det stora djupet gör att kraven på de tekniska barriärerna kapsel och buffert är lägre för konceptet djupa borrhål än för KBS-3-alternativet. Som en utgångspunkt har vi ansatt funktionskraven på kapseln till att den bör klara de mekaniska påfrestningarna på förvarsdjup och vara kemiskt intakt i 1 000 år. Då har fissionsprodukterna avklingat och aktiviteten i avfallet sjunkit till en tiondel av den vid deponeringen. Ett läckage efter denna tidpunkt bedöms inte kunna nå markytan och förorsaka oacceptabla stråldoser i biosfären.

Återtagbarheten är en fråga som ofta diskuteras i förvarssammanhang. I SKI:s förslag till föreskrifter /1-8/ finns inget krav på återtagbarhet, däremot står det att "eventuella åtgärder som vidtas för att underlätta återtagning av deponerat kärnavfall från slutförvaret inte får påverka barriärernas funktion så att slutförvarets säkerhet försämras". I SKB:s filosofi för deponering i ett KBS-3-förvar ingår dock återtagbarhet som en väsentlig del. Efter en inledande provdrift av ett djupförvar ska det vara möjligt att ta tillbaka de deponerade kapslarna.

En liknande filosofi för alternativet djupa borrhål skulle betyda att en provdeponering skulle omfatta mellan två och fyra borrhål som färdigställs och i vilka kapslar deponeras och hålen försluts. Utgångspunkten är att samma krav på återtagbarhet ska gälla för kapslarna i ett djupt borrhål, som för kapslarna i ett KBS-3-förvar. Vi har därför ansatt 20 år som en bortre gräns för när de deponerade kapslarna kunna återtas. I princip är detta möjligt men det finns idag inga tekniska lösningar för vare sig deponeringen eller återtag. Därför anser vi att frågan om återtag ut djupa borrhål är öppen. Det finns inget som talar emot att det går att återta deponerade kapslar, men det skulle krävas en omfattande utveckling av tekniken och det finns heller ingen garanti för att utvecklingen skulle leda till ett lyckat resultat.

#### **1.4 Vad innebär konceptet djupa borrhål jämfört med KBS-3-konceptet?**

I djupa borrhål är det berget som utgör den viktigaste barriären för att isolera avfallet och förhindra spridning av radioaktiva ämnen till biosfären. På två till fyra kilometers djup är grundvattenförhållandena mycket stabila och de eventuella grundvattenrörelser som förekommer förväntas ske på stort djup utan kontakt med markytan och därmed utan möjlighet att transportera radionuklider upp till markytan. Detta återstår dock att visa i en säkerhetsanalys.

Även om den väsentliga långsiktiga säkerheten i konceptet ligger i bergets funktion så finns det andra barriärer. Kapseln ska konstrueras för att motstå den mekaniska påverkan som uppstår på fyra kilometers djup. Bufferten har till främsta uppgift att fixera kapslarna i sina lägen efter deponeringen. Liksom vid KBS-3 utnyttjas flera barriärer, men betoningen på barriärerna är olika. I djupa borrhål är bergets barriärfunktion avgörande för att uppnå avsedd säkerhet.

KBS-3-förvaret byggs i berget på cirka 500 meters djup. Anläggningsutformningen föregås av detaljerade undersökningar av bergets beskaffenhet. Därmed kan vi anpassa förvaret till de förhållanden som råder i berget. KBS-3-förvaret förses med flera oberoende barriärer. De viktigast är kopparkapseln och bentonitleran. Den senare utgör en mekanisk och hydraulisk buffert kring kapseln. Bergets roll i KBS-3-konceptet är att garantera mekanisk och kemisk stabilitet. Det ska också garantera sådana gynnsamma förhållanden att grundvattenomsättningen på det tilltänkta förvarsdjupet blir låg. Dessa faktorer är avgörande för kopparkapseln och buffertens funktion. Sekundärt fungerar berget också som ett transportmotstånd om radionuklider trots allt skulle komma ut ur kapseln och genom bufferten.

I KBS-3 är således ingenjörbarriärerna, kapseln och bufferten, garantierna för isoleringen i samverkan med berggrunden. I djupa borrhål är det i första hand berggrunden som garanterar att spridningen av nuklider inte når markytan. I KBS-3-konceptet kommer isolering i intakta kapslar över mycket lång tid och fördröjning av eventuellt nuklid-

läckage att ha betydelse då den långsiktiga säkerheten analyseras. I djupa borrhål kommer kapseln att ha en mycket kortare livslängd, därför att kapseln är tunnare och den kemiska miljön aggressivare. Det får som konsekvens att endast funktionen fördröjning av nuklidläckage kommer att ha betydelse i en säkerhetsanalys.

Att lokalisera ett lämpligt område för deponering i djupa borrhål är förenat med större osäkerheter än motsvarande lokalisering av ett KBS-3-förvar. Emellertid är principen likartad: Utifrån berggrundskartor väljs potentiellt lämplig plats, vars lämplighet måste bekräftas med borrhning. Skillnaden är att KBS-3-förvaret lättare kan anpassas till berggrunden, så att deponeringshålen redan från början kan borrar på lämpliga platser. För djupa borrhål måste den miljö som deponeringshålet påträffar accepteras eller förkastas som helhet, även om acceptans kan innebära deponering i begränsade delar av hålet.

Området på markytan som upptas vid djupborrningen är större än det som behövs för ett KBS-3-förvar. Varje djupt hål kräver ett område runt omkring med mellan ett och tvåhundra meters sida. Material som används vid borrhningen måste tas om hand. Miljöpåverkan vid deponering i djupa hål blir således större än vid deponering i ett djupförvar av KBS-3-typ. Detta får konsekvenser för MKB-arbetet. De aktiviteter som behövs för att ta fram ett MKB-dokument behandlas emellertid inte i programförslaget. Verksamhetsområdena kapsel, inkapsling och transporter liknar till stora delar motsvarande system för KBS-3.

I dagsläget finns teknik för borrhning av djupa borrhål, men den behöver utvecklas för att klara den grova dimension det här är fråga om. Utrustning för deponering finns inte, inte heller de åtgärder som kommer att behövas för strålskärning och för ett eventuellt återtag av kapslarna ur deponeringshålen.

## **1.5 FUD-programmets innehåll och struktur**

Programmet innehåller fem huvuddelar:

- Kunskapsläge och forskningsprogram för geovetenskap
- Kunskapsläge, forsknings-, utvecklings- och demonstrationsprogram för teknikfrågor
- Kunskapsläge och forskningsprogram för de tekniska barriärerna
- Kunskapsläge och utvecklingsprogram för säkerhetsanalys
- Tidsplaner och kostnader

I varje avsnitt beskrivs dagens kunskapsläge och det utvecklingsbehov som krävs för att konceptet djupa borrhål ska nå KBS-3-konceptets kunskapsnivå. Huvudfrågeställningarna presenteras för varje delområde. Där så är lämpligt har vi använt samma struktur som den vi använt för att belysa processer som påverkar ett KBS-3-förvar /1-10/. Samma processer är även viktiga för djupa borrhål, men kanske i något varierande grad. Där processernas effekter på förvarssystemet är osäkra krävs forsknings- och utvecklingsinsatser.

I sista avsnittet summeras planerade aktiviteter till en tidsplan för genomförande av FUD programmet för djupa borrhål. Även kostnaderna summeras.



Beskrivningarna i avsnitten om geovetenskap och teknik är detaljerade. Anledningen till detaljrikedomen är att dessa två områden är de som skiljer sig mest från KBS-3-konceptet och där såväl kunskapsläget som utvecklingsbehov kräver en noggrann genomgång för att det ska vara möjligt att belysa tids- och kostnadsbehovet för programmet. Den läsare som inte är intresserad av vad kostnads- och tidsbehoven baseras på kan gå direkt till avsnittet sammanfattning av tidsplaner och kostnader, eller till slutsatser.

## Referenser

- /1-1/ SKB Projekt AlternativStudier för Slutförvar (PASS), Svensk Kärnbränslehantering AB, 1992.
- /1-2/ Regeringsbeslut Program för forskning, utveckling och demonstration för kärnavfallens behandling och slutförvaring, FUD-program 98, d.nr. M1999/2152/Mk, M1999/3040/Mk.
- /1-3/ SKB Komplettering till FUD-program 98. Samlad redovisning av metod, platsval och program inför platsundersökningsskedet, Svensk Kärnbränslehantering AB, 2000.
- /1-4/ SKB Detaljerat program för forskning och utveckling 1999–2004, Svensk Kärnbränslehantering AB, 1998.
- /1-5/ Miljöbalk (1998:808).
- /1-6/ Lag (1984:3) om kärnteknisk verksamhet.
- /1-7/ Strålskyddslag (1988:220).
- /1-8/ Statens strålskyddsinstitutets föreskrifter (SSI FS 1998:1) om skydd av människors hälsa och miljö vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall.
- /1-9/ Statens kärnkraftinspektion föreskrifter (SKIFS 2000:X) om säkerhet vid slutförvaring av kärnavfall (in prep).
- /1-10/ SKB SR 97 – Processer i förvarets utveckling. Svensk Kärnbränslehantering AB, 1999.

## 2 Geovetenskap

### 2.1 Förhållanden på stora djup

Kunskapen om de geovetenskapliga förhållandena på stora djup (1 000–5 000 meter) är betydligt mindre än kunskapen om förhållandena närmare markytan. Endast ett mycket begränsat antal djupa borrhål har borrats i en berggrund som liknar den svenska. Inom den Baltiska skölden finns data från endast tre platser:

- Kolahalvön – Här finns världens djupaste borrhål (12 735 meter).
- Dalarna – Provborrhningar för djupgas skedde här på 1980-talet i Gravberg (6 957 meter) och Stenberg (7 000 meter).
- Laxemar – SKB har här låtit borra ett forskningshål (1 700 meter).

Dessutom finns en del relevanta data från ner till cirka 1 000 meter djupa gruvor. Ytbaserade geofysiska mätningar ger också värdefull information om förhållandena på stora djup.

SKB har sammanställt all den relevanta information som finns om förhållandena på stora djup i kristallin berggrund i olika delar av världen /2-1/. Med hjälp av denna gjordes en geovetenskaplig beskrivning av berget och grundvattnet ner till fem kilometers djup.

SKB:s ordinarie forskningsprogram inkluderar också studier av djupa strukturer och tektoniken i Östersjöområdet /2-2/ samt en analys av data från det 5 400 meter djupa borrhålet SG-4 i Uralbergen /2-3, 2-4/.

#### 2.1.1 Termiska processer

Värme transporteras naturligt genom jordskorpan mot jordens yta. I berggrunden alstras även värme genom radioaktivt sönderfall av isotoper av grundämnena uran, torium och kalium. Vissa bergarter innehåller högre halter av dessa ämnen, vilket då återspeglas i högre geotermiska gradienter.

Det geotermiska värmeflödet mot markytan bestäms av värmeledningstalet och av den geotermiska gradienten. Värmeflödet kan bestämmas genom mätningar av temperaturen i grunda borrhål. Dessa värden är emellertid ofta för låga, eftersom de har påverkats av klimatet, och måste därför korrigeras för att man ska kunna få fram det verkliga värme-flödet. Genom att anta hur stor bergets värmeproduktion respektive värmekonduktivitet är kan man beräkna temperaturen på djupet.

Temperaturen på 5 000 meters djup kan på detta sätt uppskattas till mellan 60 och 105 °C. De mätningar som finns inom den Baltiska skölden visar i regel god överensstämmelse mellan beräknade och uppmätta data. I Gravberg-1 bestämdes temperaturen till 89 °C på ett djup av 5 180 meter /2-5/. Den geotermiska gradienten var nära nog konstant (16 °C/km). I borrhålet SG-3 på Kolahalvön uppvisar däremot gradienten en snabb förändring från 13 °C/km till 17°C/km på 2 800 meters djup.

Bergartens mineralsammansättning avgör hur stor bergets förmåga att leda och lagra värme är. Proportionerna mellan olika bergarter i den berggrund som genomborras av de djupa borrhålen avgör storleken på den effektiva värmekonduktiviteten. Värme-lagringsförmågan beror på bergets värmekapacitivitet och densitet. En viss osäkerhet råder när det gäller de uppskattade värdena på värmekonduktiviteten och värmekapacitiviteten på de aktuella djupen. Detta beror på svårigheter att förutsäga de geologiska förhållandena i djupa borrhål, eftersom berggrunden är så heterogen i sin struktur och litologi.

Höga bergspänningar leder i allmänhet till att sprickorna i berget pressas samman, vilket ökar värmekonduktiviteten. Volymandelen sprickor i kristallint berg på stora djup är emellertid så liten att effekten kan försummas. Värmekonduktiviteten är svagt temperaturberoende.

### **2.1.2 Hydrauliska processer**

De hydrauliska processerna som är aktuella för förvarskonceptet djupa borrhål är grundvattenströmning och gasströmning/gaslösning.

I princip styrs det naturliga grundvattenflödet i den övre delen av jordskorpan av:

- grundvattenbildningen
- topografiskt orsakade tryckgradienter
- variationer i grundvattnets densitet
- termisk konvektion.

Vattenflödets storlek beror dels på den drivande kraftens storlek, dels på berggrundens vattenförande egenskaper. De vattenförande egenskaperna beror på sprickstrukturens flödesegenskaper och vattnets egenskaper. Vattnets flödesegenskaper beror i sin tur på viskositeten, som är kopplad till temperatur och salthalt. Högre temperatur innebär att vattnets viskositet blir lägre. Därmed ökar också den hydrauliska konduktiviteten. Med den geotermiska gradient som är normal i Sverige halveras viskositeten då djupet ökar två kilometer.

En vattenpartikels väg från inströmnings- till utströmningsområde bestäms av topografi, vattnets densitetsfördelning och berggrundens vattenförande egenskaper. Ju djupare ner i berget vattenpartikeln befinner sig, desto storskaligare är i regel flödessystemet. Vattnets densitet är i huvudsak beroende av temperaturen och sammansättningen, främst salthalten. Termisk konvektion har föreslagits som en mekanism för djupt regionalt grundvattenflöde inom den Baltiska skölden /2-6/, men bedöms vara av mycket ringa betydelse.

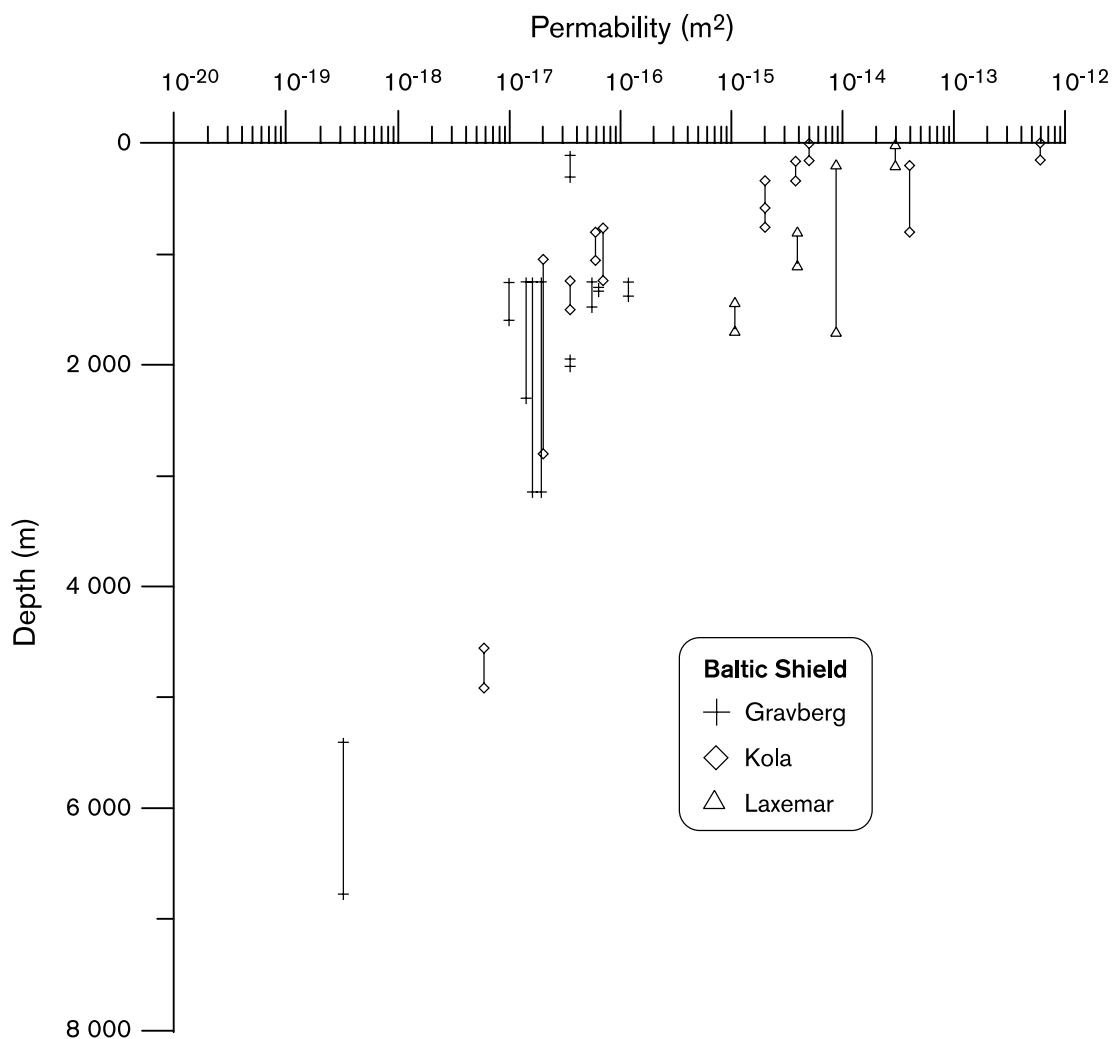
Salt grundvatten påträffas ofta nära kusten samt i inlandet på stora djup, se vidare avsnitt 2.1.5. När salthalten ökar med djupet medför detta att flödet minskar. Grundvattnet kan härigenom bli mer eller mindre orörligt på stora djup.

Olika beräkningar av det storskaliga grundvattenflödet /t ex 2-7, 2-8, 2-9/ visar, med eller utan hänsyn tagen till densitetsskillnader, att djupfördelningen av hydraulisk konduktivitet i hög grad bestämmer flödesfältet. En modell med avtagande konduktivitet mot djupet ger således en betydande koncentration av flöde nära markytan. På motsvarande sätt har det regionala flödet även studerats med hjälp av matematiska lösningar /2-10/.

En databas med resultat från mätningar av hydraulisk konduktivitet (permeabilitet) i djupa borrhål /2-11/ visar tydligt att vattengenomsläppligheten avtar med djupet, se figur 2-1. På 5 000 meters djup är maxvärdena endast en tusendel av maxvärdena på 1 000 meters djup. Antalet mätningar är dock så få, att man måste vara försiktig med att dra alltför långtgående slutsatser. I figuren framgår att bergmassans konduktivitet varierar mycket.

En sammanställning av data från olika typer av experiment i olika skalor i kristallint berg /2-12/ visar skillnader på åtta tiopotenser mellan de högsta och de lägsta värdena. Frekvensen av öppna sprickor, deras rumsliga fördelning, storleksfördelning, form och orienteringsfördelning avgör hur hydrauliskt sammanbundna sprickorna är.

Sprickornas hydrauliska sprickvidd är starkt beroende av den effektiva normalspänningen. Ju högre spänningen är, desto mindre är sprickvidden. Den ökning av effektivspänningen som sker mellan 1 000 och 5 000 meters djup är så stor att man generellt kan förvänta sig en minskning av sprickvidden och därmed också av bergmassans permeabilitet. Laboratoriestudier visar emellertid att sprickor, där en relativ förskjutning av sprickytorna skett, kan stå öppna även då de utsätts för höga spänningar /2-13/.



Figur 2-1. Sammanställning av in-situ-mätningar av permeabilitet i djupa borrhål /2-11/.

Sammanställningar av hur sprickfrekvensen varierar med djupet i de djupa borrhålen visar inte någon tydlig förändring mot djupet /2-1/. Observationer både i Sverige /2-14/ och på andra platser /2-15/ visar en starkt korrelation mellan låga P-vågshastigheter och förekomst av vattenförande sprickzoner i borrhål.

Portrycket har bara mätts vid några få tillfällen vid borrning av de djupa hålen. I allmänhet visar dessa data att portrycket på olika nivåer i stort sett stämmer överens med det teoretiska hydrostatiska trycket. Det huvudsakliga undantaget är det djupa hålet på Kolahalvön där ett 40–50 procent högre tryck uppmätts i sprickzoner på 1 000–2 800 meters djup /2-16/.

### **2.1.3 Mekaniska processer**

#### ***Bergmassans mekaniska egenskaper***

Bergmassan är uppbyggd av intakt berg och sprickor. Vid belastning deformeras dels det intakta berget, dels sprickorna. De senare deformationerna kan utgöras av förskjutningar längs sprickytorna eller sammanpressning eller vidgning av sprickorna. Vid deformation av det intakta bergmaterialet kan även nya sprickor bildas. Bergmassans deformations- och hållfasthetsegenskaper beror på både egenskaperna hos de ingående bergarterna samt på sprickornas frekvens, orientering och mekaniska egenskaper.

Det intakta bergets hållfasthet och elastiska parametrar beror i synnerhet på lastförhållanden och temperatur. Både spänningen och temperaturen ökar med djupet. Detta kan undersökas vid kontrollerade laboratorieförsök där djupförhållandena simuleras. Laboratiemätningar av tryckhållfasthet och elasticitetsmodul på Stripa-granit /2-17/ indikerar att hållfastheten ökar med ungefär 250 procent och att elasticitetsmodulen ökar med omkring 15 procent då den omslutande spänningen ökar från 0 till 30 MPa. Nackdelen med laboratiemätningar är att provets storlek är starkt begränsad, vilket gör skaleffekterna svåra att bedöma.

För intakt berg, som kan anses utgöra ett homogent isotropt material, gäller elasticitetsteoretiska samband vid måttliga spänningsnivåer. Deformationen orsakad av en given belastning är därmed bestämd av elasticitetsmodul och tvärkontraktionstal. Vid höga laster fås även ett plastiskt bidrag. Sprickbildningsprocessen startar redan vid lägre laster än den egentliga brottlasten och beror av spänningstillståndet.

Vid en temperaturökning sker för en fri bergvolym en volymexpansion som beror på bergets temperaturutvidgningskoefficient. I inspänt berg, som inte kan röra sig fritt, kommer termospänningar att byggas upp. Storleken på dessa spänningar är beroende av bergets deformationsegenskaper. Temperaturutvidgningskoefficienten har ett visst temperaturberoende, men detta är relativt litet inom det temperaturintervall som är aktuellt ner till fem kilometers djup i Sverige. Variationerna mellan olika bergarter är också relativt små.

Sprickornas skjuvhållfasthet och skjuvdeformation beror på sprickytornas egenskaper och den effektiva normalspänningen mot sprickan. Vid höga normalspänningar tenderar sprickytornas egenskaper att skjuvas av vid ett skjuvbrott. Vid lägre spänningar förskjuts sprickytorna upp på varandra, vilket leder till en utvidgning. Liksom för andra bergparametrar finns det ett skalberoende i skjuvegenskaperna. Genom att skjuvhållfastheten är en funktion av effektivspänningen kan brott uppstå vid förhöjda vätsketryck.

En teori som innebär att bergmassan befinner sig i ett tillstånd där spänningsmagnituderna begränsas av friktionen i större sprickzoner har föreslagits av Jamison och Cook /2-18/ och diskuterats av flera andra /t ex 2-19, 2-20/. Detta skulle innebära att ett tillskott i deviatorspänning stör den känsliga jämvikten så att ett skjuvbrott sker. Detta leder i sin tur till en spänningsomlagring och återställande av jämvikten. Om man accepterar teorin, kan spänningsdata utnyttjas för att uppskatta skjuvhållfastheten i bergmassan /2-19/. Resultatet av en sådan analys indikerar en ökning i friktionsvinkel med ökad normalspänning, men spridningen i data är för stor för att dra långtgående slutsatser.

Normaldeformationen av sprickor och sprickzoner svarar för merparten av den totala bulkdeformationen i bergmassan. Med ökad spänning minskar sprickornas betydelse och vid mycket höga belastningar närmar sig bergmassans deformation den för intakt berg. Normalrörelser för en enskild spricka beror av normalstyvheten som är proportionell mot normalspänningens storlek. Det innebär förenklat att en spricka på större djup är styvare. Stora sprickzoner uppvisare däremot inte ett sådant normalspänningsberoende /2-19/.

### **Bergspänningstillståndet**

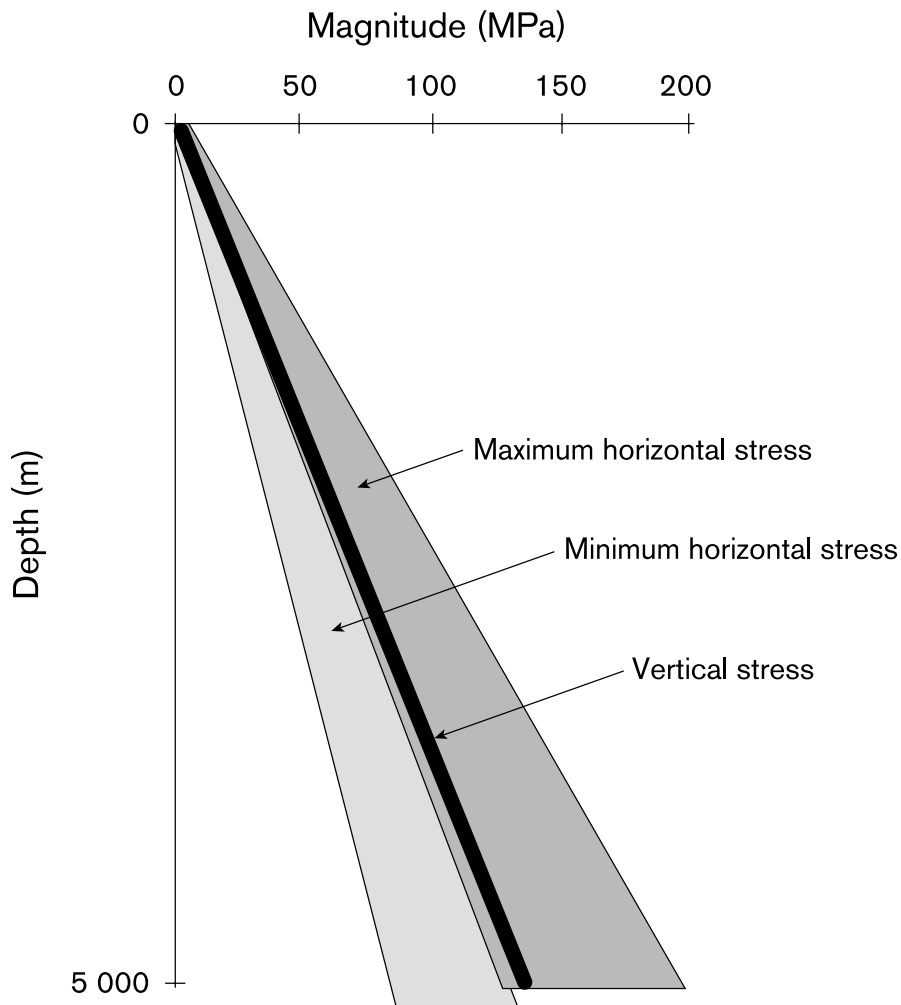
Bergsspänningstillståndet är en viktig variabel för alla mekaniska processer. De spänningar som finns i berget innan det utsätts för någon påverkan kallas för primärspänningar. Två av huvudspänningarna är orienterade mer eller mindre horisontellt. Följaktligen är den tredje huvudspänningen nära vertikal. Nuvarande kunskapsläge avseende bestämning av spänningstillståndet på stora djup har nyligen redovisats och diskuterats /2-21, 2-22/.

Resultatet från de flesta spänningsmätningar som utförts i Sverige har samlats i en databas /2-23/. Mätresultaten har analyserats med avseende på djupberoende under antagande om ett linjärt förhållande mellan magnitud och djup. Med några få undantag har data i databasen kommit från djup som är större än 1 000 meter. Endast fyra källor till spänningsinformation finns från större djup inom den Baltiska skölden; mätningar till 1 340 meters djup utanför Oskarshamn, borrhålsinformation från de djupa hålen i Gravberg och på Kolahalvön samt fokalplananalyser av jordskalv. I Gravberg gjordes inga direkta mätningar av spänningar men en del indirekt information finns. Denna är baserad på resultat av hydrauliska tester och utfall i borrhål.

En övre och en nedre gräns för spänningsmagnituder ner till 5 000 meters djup i Sverige har föreslagits /2-24/, se figur 2-2. Den övre gränsen har antagits som en extrapolation av de samband som erhållits från databasen innehållande mera ytnära data. Den nedre gränsen har antagits utifrån en analys av mätningar i djupa borrhål i kristallint berg i andra delar av världen.

$$\begin{aligned} \text{Övre gräns: } \sigma_H &= 6,5 \text{ MPa} + 0,0374 \text{ MPa/m} \\ \sigma_h &= 2,5 \text{ MPa} + 0,0255 \text{ MPa/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Nedre gräns: } \sigma_H &= 0,025 \text{ MPa/m} \\ \sigma_h &= 0,017 \text{ MPa/m} \end{aligned}$$



*Figur 2-2. Föreslagna gränser för storleken på de horisontella bergspänningarna i Sverige till ett djup av fem kilometer [2-24].*

Ytligare mätningar visar att den vertikala spänningen i medeltal motsvarar tyngden av de överliggande bergmassorna. Detta kan också antas gälla på större djup. Vertikalspänningarna kan därför till sin storlek generellt förväntas ligga mellan de horisontella huvudspänningarna. Osäkerheten när det gäller att bedöma spänningstillståndet på stora djup utan att ha tillgång till mätdata är dock betydande, kanske 30–40 procent när det gäller magnituder. Utvärderingen av ett stort antal jordskalv som inträffat mellan ett par och 30 kilometers djup visar en relativt enhetlig bild för södra Sverige. Den största huvudspänningen är orienterad NW-SE. Denna riktning överensstämmer med resultaten av in-situ-mätningar av spänningar ner till 1 000 meters djup, även om dessa resultat uppvisar stor spridning. I norra Sverige varierar de från jordskalv erhållna spänningsriktningarna betydligt mer.

Borrningen av de djupa borrhålen stör det naturliga tillståndet med deformation och spänningsomlagring som följd. Kring borrhålet uppstår en spänningspåverkad zon med sekundärspänningar som karakteriseras av höga tangentiella spänningar och låga radiella spänningar. Erfarenheter från borrningar av djupa borrhål har visat att brott i borrhålsväggen kan inträffa på 1 000–5 000 meters djup på grund av höga och/eller anisotropa spänningar. Brotten kan utgöras av såväl nya sprickor i intakt berg som av sprickpropagering och skjubrott i befintliga sprickor.

Till den spänningskoncentration som uppstår kring borrhålet ska också adderas de termospänningar som uppkommer då bergets temperatur ökar på grund av bränslets resteffekt, se ovan.

### **Naturlig seismicitet**

Ett jordskalv inträffar när töjningsenergi, som ackumulerats på grund av en långsamt pågående krypdeformation, plötsligt frigörs genom skjuvrörelser längs en diskontinuitet. Skalvet sker när spänningskoncentrationen kring de ojämnheter i sprickplanet som låser rörelser är tillräckligt stor för att brott ska ske. Efterskalv kan komma om inte tillräckligt mycket töjningsenergi frigjorts för att stabiliteten i området återställs.

I ett internationellt perspektiv har Sverige få jordskalv. De jordskalv med epicentra ytligare än fem kilometer som inträffat historiskt har haft magnituder mindre än 3. Kraftigare jordskalv sker i allmänhet på betydligt större djup. Det finns dock geologiska observationer, exempelvis vid Lansjärvsförkastningen, som visar en kraftig seismisk aktivitet i samband med isavsmältningen.

Det finns två olika teorier för vad som är den huvudsakliga orsaken till den nuvarande seismiciteten i den Baltiska skölden och detta har diskuterats /2-25, 2-26/.

- Deformationer orsakade av plattetektonik
- Deformationer orsakade av den landhöjning som fortfarande pågår efter den senaste istiden.

### **2.1.4 Kemiska processer**

Advektion är normalt den viktigaste transportprocessen för lösta ämnen i grundvattnet. Den leder också till att olika vattentyper ersätter varandra och/eller blandas. Om grundvattenflödena är mycket låga, dvs om förhållandena är stagnanta vilket kan förväntas på stora djup, kommer diffusion att få större betydelse för transporten av lösta ämnen. Reaktionen mellan bergmatris och grundvatten har generell betydelse för grundvattnets kemiska utveckling. Grundvatten som strömmar genom sprickor kan erhålla tillskott av mineral som löses ut från sprickyterna. Omvänt kan ämnen som är lösta i vattnet fällas ut på sprickyterna. De flesta reaktioner är så långsamma att fullständig kemisk jämvikt inte hinner uppnås, även om grundvattnets omsättning på stora djup är mycket långsam.

Mikrobers och mikrobiella processers betydelse för grundvattnets sammansättning har uppmärksammats mer och mer. Förekomsten av mikrober har dokumenterats ner till åtminstone 1 500 meter.

Kolloidala partiklar, d v s partiklar med en diameter mindre än 450 nanometer kan endast förekomma i mycket låga halter i vatten på stora djup, eftersom salthalten är hög.

Gasers löslighet i vatten beror både av det hydrostatiska trycket och av temperaturen. Lösligheten är direkt proportionell mot det hydrostatiska trycket. Gas i djupa grundvatten i kristallint berg, bland annat metan och väte, härrör normalt från jordens inre men kan också vara bildad genom mikrobiell aktivitet.



## **Kemisk sammansättning hos djupa grundvatten**

Nederbörd som infiltrerar genom berggrunden mot större djup har förstås påverkats kemiskt av jordlagren för att sedan reagera med material på de vattenledande sprickornas yta. Den normala hydrogeokemiska utvecklingen innebär att vattnet blir mer alkaliskt med ökat djup och att det innehåller högre halter av lösta salter (TDS). Ju högre flödes hastighet som vattnet har, desto mindre hinner vattnet reagera med berget. Innehållet av lösta salter blir då mindre. Normalt innebär detta att färskt eller bräckt vatten dominerar ner till ungefär 500 meters djup. På ungefär 1 000 meters djup ändrar sig vanligen flödesförhållandena och grundvattnet får högre salthalt. Även dessa vatten är dock påverkade av yt nära processer. I berggrunden sker en blandning av vatten med olika ursprung, exempelvis marina vatten i kustnära områden och vatten som härstammar från tidigare istider. En tolkning av den framtida grundvattenkemin kräver betydande kunskap om de förhållanden som har givit upphov till dagens situation.

På djup som överstiger 1 000 meter har man i borrhål och gruvor i den kanadensiska skölden påträffat salta grundvatten (TDS 10 000–100 000 mg/l) och brines (TDS >100 000 mg/l). Orsaken till de mycket höga salthalterna har diskuterats. Det är mer eller mindre allmänt accepterat att ingen enskild källa eller process kan svara för de höga salthalter som observerats på stora djup inom sköldområdena /t ex 2-27, 2-28/. De flesta vattenprov som analyserats tycks representera en blandning av meteoriskt vatten och koncentrerad brine /2-29/. Den senare kan vara ett relict havsvatten eller en vätska vars sammansättning uppkommit genom reaktioner mellan berg och vatten och där saltet lakats ur berget under långa tidsrymder.

Studier utförda i Kanada /2-30/ har indikerat att det inte finns någon tydlig korrelation mellan grundvattenkemin och vilken bergart som dominerar. Den kemiska sammansättningen hos djupa brines domineras på alla platser av samma grundämnen med liknande maximala koncentrationer. Detta skulle då innebära att om grundvattenkemin på stora djup undersökts på en plats kan denna kunskap föras över till en annan plats utan att motsvarande undersökningsinsatser behöver genomföras. Mot denna slutsats talar dock vissa finska studier /2-31/ som har visat på ett samband mellan berggrundens geokemi och typen av brine (Ca–Cl eller Na–Cl).

Grundvattnets pH-värde påverkar bland annat den kemiska stabiliteten och förutsättningarna för radionuklidtransporten. Erfarenheter från djupa borrhål i Kanada har visat skillnader i surhetsgrad mellan brines (pH 5–7) och grundvatten med lägre salthalt (pH 6–9).

## **Gas i djupa grundvatten**

Förekomsten av djupgas inom sköldområdena har bidragit till att man kan bestämma ursprunget hos salta grundvatten. Framför allt har analys av metan gjort det möjligt att avgöra om  $\delta^{13}\text{C}$  har ett biogent ursprung eller inte /2-32/. Metan förekommer ofta i djupa borrhål och gruvor och uppträder i varierande proportioner tillsammans med andra kolväten, kväve, helium och argon. Ibland finns också vätgas i betydande mängd. Den metangas som finns på stora djup har ett icke biogent ursprung. Analyser av gasinnehållet i de djupa salta grundvattnen från Laxemar tyder på långa uppehållstider, d v s ett mer eller mindre stagnant vatten.

Ackumulation av stora mängder helium (även av metan och kväve) på stora djup kan tolkas som att en diffusion uppåt ibland är förhindrad, vilket potentiellt kan leda till att ett gastryck byggs upp. Det finns exempel från gruvor inom den kanadensiska skölden där man vid borrning plötsligt råkat ut för höga tryck.

## **Mikrobiella processer**

Mikrobiellt liv på mer än 100 meters djup i Sverige är sedan relativt lång tid väl dokumenterat i litteraturen /2-33, 2-34, 2-35/. Den näring, till exempel organiskt material, som bakterierna lever på har ansetts transporterad med grundvattnet från markytan mot djupet.

På senare år har förekomsten av bakterier påvisats på ännu större djup i kristallin berggrund, åtminstone ner till 1 500 meters djup /2-36/. Dessa bakterier är inte beroende av fotosyntesen och kräver varken organiskt material eller syre för att överleva. Anaeroba organismer kan utnyttja väte som energikälla för att omvandla koldioxid till biomassa och metan bildas då som en biprodukt.

Insikten om att bakterier kan existera på mycket stora djup i berggrunden och här producera stora mängder metangas kan innebära att tidigare tolkningar av grundvattenkemins utveckling måste modifieras.

### **2.1.5 En geovetenskaplig modell ner till 5 000 meters djup**

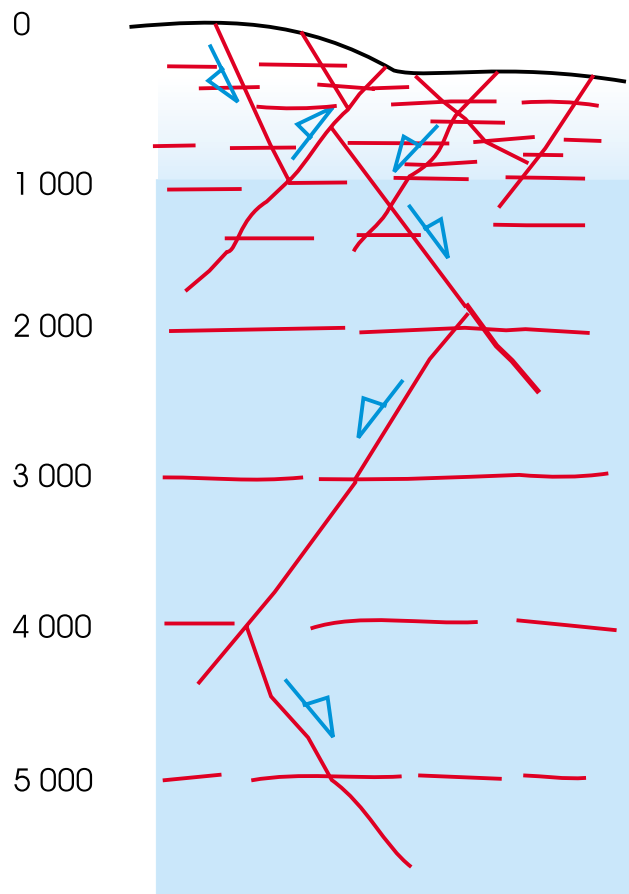
Den konceptuella modell av de översta fem kilometrarna av jordskorpan i Sverige som föreslagits av Juhlin m fl /2-1/ bygger på att den övre kilometern av berggrunden innehåller betydligt fler öppna sprickor och är mer permeabel än de djupare delarna, se figurerna 2-3 och 2-4. Vattenförande sprickzoner finns dock ner till mycket stora djup. Antagandet om en högre porositet och permeabilitet inom den övre delen är i första hand baserat på geofysiska mätningar men också till viss del på hydrogeologiska observationer.

Även om denna bild av uppsprickning och permeabilitet förefaller vara relativt universell skiljer sig de vattenkemiska förhållandena betydligt mellan olika geografiska lägen. I områden med förhållandevis flack topografi är aktiv grundvattencirkulation i huvudsak begränsad till den övre kilometern medan vattnet har relativt hög salthalt under denna nivå. Det mycket salta djupa grundvattnet befinner sig i en nära nog stagnant miljö. I områden med större topografiska skillnader kan sötvatten som infiltreras drivas ner till mycket stora djup och gränsen till salt vatten ligger betydligt djupare.

Skillnaderna i temperaturgradienter mellan olika delar av Sverige bedöms vara så små att de inte ger upphov till några nämnvärda skillnader i grundvattencirkulation jämfört med vad som orsakas av variationer i topografin. Under ett djup av cirka en kilometer i södra Sverige och mellan en och tio kilometer i norra Sverige finns det alltid grundvatten med hög salthalt eller brines. Dessa vatten har varit i princip stagnanta under mycket lång tid (hundratusentals år till flera miljoner år).

Den storskaliga stabiliteten i bergmassan på stora djup är beroende av spänningsfältet, förekomsten av sprickor och sprickzoner och dessa mekaniska egenskaper samt av den seismiska aktiviteten. I den konceptuella modellen ökar spänningsmagnituderna linjärt mot djupet.

Sprickor och sprickzoner på stora djup utgör de svagaste och lättast deformerbare delarna av bergmassan. Detta innebär också att de rörelser som sker vid till exempel ett jordskalv i första hand löses ut i dessa diskontinuiteter.



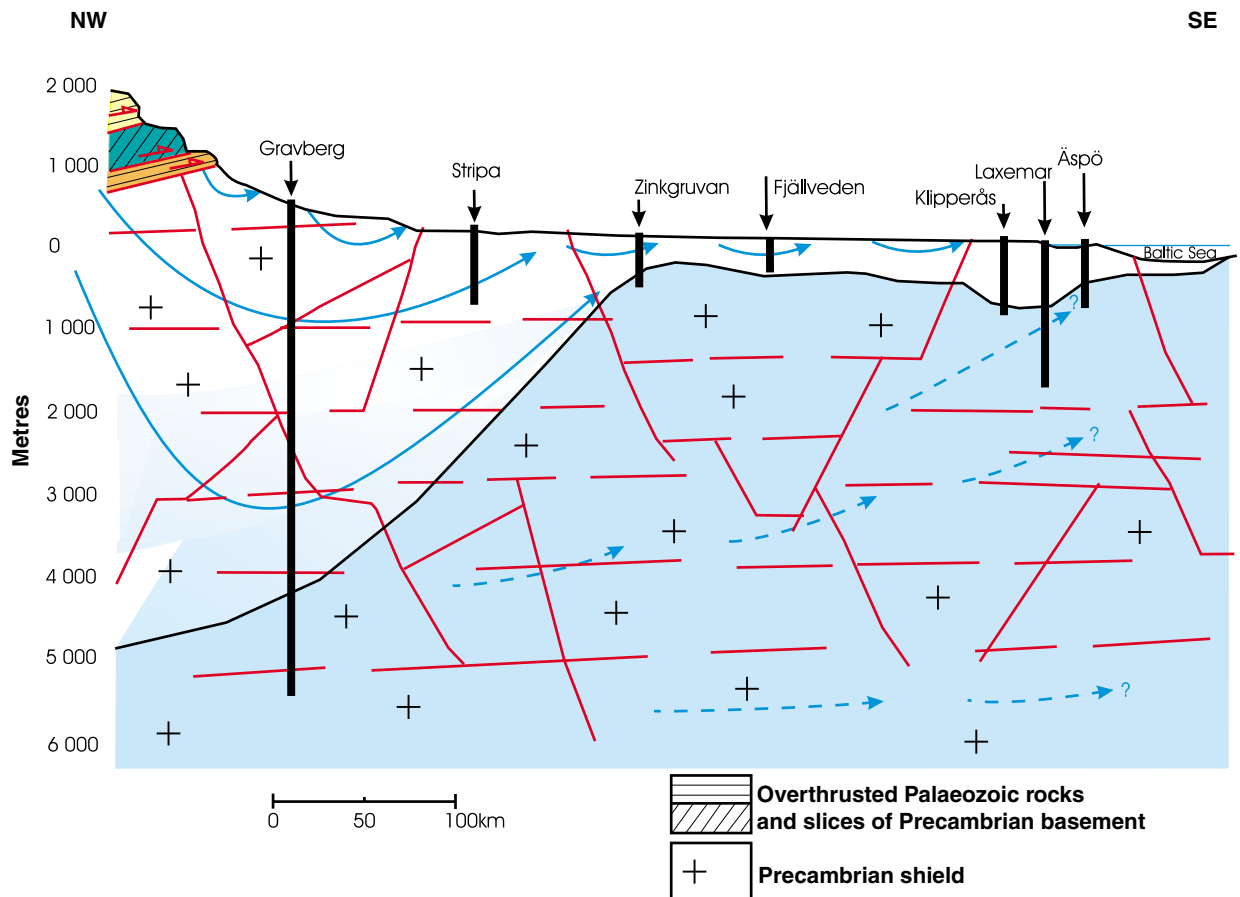
*Figur 2-3. Uppsprickning i den övre delen av jordskorpan. Den övre kilometern berg är mer uppsprucken och har högre vattengenomsläpplighet än djupare delar där vattenflödet i första hand är begränsat till större diskreta sprickzoner. Ökad salthalt mot djupet markeras i figuren av mörkare färg.*

## 2.2 Geovetenskaplig forskning

### 2.2.1 Grundläggande principer för förvarskonceptet

I avsnitt 2.1.5 beskrevs översiktligt en konceptuell modell av de geovetenskapliga förhållandena ner till fem kilometers djup. Modellen är en sammanvägd tolkning av vår samlade kunskap idag och utgör den geovetenskapliga förutsättningen för förvarskonceptet djupa borrhål. Varken den långsiktiga säkerheten hos ett djupförvar för använt kärnbränsle enligt detta koncept eller det praktiska utförandet av förvaret bedöms förutsätta platsunika geologiska förhållanden. Däremot finns det ett antal diskvalificerande faktorer, av vilka en stor del redan i dagsläget kan anses vara kända genom FUD-arbete för KBS-3. Andra faktorer måste identifieras, definieras och i vissa fall kvantifieras inom ramen för ett framtida forskningsprogram. Det är i detta sammanhang viktigt att poängtera att förvarskonceptet djupa borrhål bygger på ett flexibelt djup med hänsyn till de regionala och lokala geovetenskapliga förhållandena.

De geovetenskapliga aspekterna är i första hand förknippade med förvarets funktion och säkerhet men påverkar även byggandet av förvaret, i detta fall främst förutsättningarna för att åstadkomma mekaniskt stabila deponeringshål på stora djup.



Figur 2-4. Vattencirkulation och variationer i salthalt längs en profil genom Sverige /2-1/.

Några geovetenskapliga faktorer som är gynnsamma för förvarskonceptet från säkerhets-synpunkt har tidigare lyfts fram av Juhlin och Sandstedt /2-37/ och Juhlin m fl /2-1/:

- Förekomst av vatten med hög salthalt på djupet
- Lägre porositet och permeabilitet i bergmassan på stora djup

När det gäller salt grundvatten vet vi från undersökningar i borrhål att ett relativt sött vatten dominerar åtminstone till cirka 500 meters djup. Salthalten ökar successivt med djupet för att under ett djup av cirka 1 000–1 500 meter i flera fall övergå till värden som motsvarar brine. Övergången mellan sött och salt vatten kan ibland påverkas av flacka sprickzoner. Antalet djupa borrhål där provtagning utförts är emellertid mycket begränsat, och vi vet att ovan beskrivna förhållanden inte råder överallt. Sannolikt är djupet för övergången till höga salthalter beroende av närheten till kusten och topografiska förhållanden, såsom illustreras i figur 2-4. Vi vet heller inte hur stabila dessa förhållanden är.

Att bergmassans genomsläpplighet generellt avtar med djupet är en slutsats som även den baserar sig på ett fåtal utförda hydrauliska mätningar på stora djup samt på geofysiska indikationer att bergmassans porositet är betydligt lägre under en till två kilometers djup. Dessutom underbyggs slutsatsen ytterligare av de hydrokemiska observationerna. Vi vet dock samtidigt att zoner med hög vattenförande förmåga har observerats på stora djup i de flesta djupa borrhål, varför vi inte direkt kan förutsätta att bergmassan på en specifik plats erbjuder en låg permeabilitet på djupet.

En viktig fråga att besvara är om vi kan uppfylla kraven på långsiktig säkerhet hos förvaret även om ogynnsamt orienterade zoner med relativt hög vattengenomsläpplighet finns på deponeringsdjup i kombination med grundvatten med låg salthalt. Vilka andra kombinationer av egenskaper eller förutsättningar måste i så fall vara uppfyllda?

När det gäller platsvalet i övrigt är det fördelaktigt ur en geologiskt synvinkel om förvaret förläggs inom en stor relativ homogen bergvolym. De största möjligheterna att förutsäga de litologiska förhållandena på fem kilometers djup har man i granitisk berggrund. Hur litologiskt heterogen en bergmassa kan vara och ändå erbjuda tillfredsställande förhållanden på djupet är en fråga som måste besvaras inom ett forskningsprogram.

Inom vissa delar av Sverige överlagras yngre sedimentära bergarter det kristallina urberget. Detta "sedimentära lock" kan innebära både för- och nackdelar. Sannolikt överväger dock nackdelarna genom att det är svårt att kartlägga sprickzoner i det underliggande urberget.

Stora brantstående tektoniska zoner måste undvikas vid ett platsval. Likaså kan djupt liggande flacka zoner med stor horisontell utsträckning innebära potentiella läckagevägar. Frågan är dock hur nära en sådan zon man kan förlägga förvaret.

Djupförvaring i borrhål, som sker inom ett djupintervall mellan två flacka sprickzoner, kan å andra sidan innebära fördelar genom att omfattningen av den konvektiva cirkulationen reduceras (hydraulisk bur).

Den seismiska aktiviteten i den Baltiska skölden är låg i förhållande till områden med pågående orogenes. De skalv som sker är främst lokaliserade till Vänerområdet och längs Norrlandskusten. En liten del av skalven är ytliga (fokaldjup <5 km). Inventeringar har visat att mellan 1967 och 1992 registrerades 18 sådana skalv, de flesta med magnituder mellan 2 och 3 /2-38, 2-39/. Större skalv sker generellt på större djup i jordskorpan /2-1/. Mer kunskap om naturlig seismicitet och dess orsaker är väsentlig för utveckling av förvarskonceptet.

Förutom att identifiera diskvalificerande faktorer, måste övriga geovetenskapliga platsvalskriterier formuleras inom ramen för ett forskningsprogram. Ett bidragande underlag för detta kan erhållas genom känslighetsstudier där utvalda parametrar ges olika värden.

## **2.2.2 Program för forskning, utveckling och demonstration**

Programmet består av två delar: ett kontinuerligt, långsiktigt program och ett program med geovetenskapliga platsundersökningar som utförs i successiva steg. Det kontinuerliga programmet syftar till att generellt öka kunskapen och förståelsen för olika processer och till att ta fram erforderligt dataunderlag och metodik för platsval och säkerhetsanalyser. Dessutom krävs bland annat utveckling av utrustning och lämplig metodik för mätningar och provtagning. Det stegvisa undersökningsprogrammet innebär borrhning till mellan fyra och fem kilometers djup samt mätning och provtagning på flera platser. Det med huvudsakliga syftet är att samla geovetenskapliga data och att utprova teknik och metodik.

Det geovetenskapliga FUD-programmet utgör en del av ett allmänt FUD-program, inom vilket nödvändig övrig teknikutveckling sker, inklusive utprovning av borrhningsteknik, deponeringsteknik samt metoder för återtag, se kapitel 3.

Olika frågeställningar, uppsatta mål och genomförande av olika forskningsaktiviteter redovisas i följande avsnitt uppdelat på geologi, termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska processer samt transport i geosfären. Därefter redovisas översiktligt det stegvisa programmet. Mellan de kontinuerliga och stegvisa programmen finns ett stort antal kopplingar. Likaså bygger genomförandet av en del av fältundersökningsmomenten på forsknings- och utvecklingsaktiviteter som finns beskrivna i kapitel 3.

Vissa geovetenskapligt inriktade FUD-aktiviteter som ska utföras kan inte direkt placeras in under någon enskild typ av process, utan är av mer övergripande natur. Följande aktiviteter planeras:

- Inventering och bevakning av den relevanta tekniska och vetenskapliga utveckling som sker inom andra områden än kärnavfallslagring. Många av de frågeställningar och problem som är väsentliga att studera för utveckling av förvarskonceptet djupa borrhål är även aktuella inom andra områden, exempelvis vid utvinning av olja, gas eller geotermisk energi. Genom att kontinuerligt bevaka och följa upp den utveckling som sker kan en stor mängd värdefull kunskap och gjorda erfarenheter överföras till SKB.
- Samarbete med pågående djupborrningsprojekt i andra länder. För att kunna nå uppställda kunskapsmål inom en begränsad tid och till en rimlig kostnad, är det nödvändigt att samarbete etableras med de pågående projekt som kan vara av intresse. I första hand är deltagande av svenska forskargrupper i rent vetenskapliga djupborrningsprojekt aktuella. Eventuellt kan även medverkan i avgränsade delar av projekt med kommersiell inriktning vara aktuella.
- Fördjupade studier av data från befintliga djupa borrhål. Kostnaderna för att utföra nya undersökningar av berggrunden på de aktuella djupen är mycket höga och det är viktigt att söka få fram mesta möjliga information från redan utförda borrhål och borrhålsundersökningar. Tidigare utredningar, t ex /2-1/, har varit relativt begränsade och koncentrerade framförallt på data som finns tillgängliga i öppen litteratur. Mer information finns att tillgå från en del borrhål. Framför allt är det viktigt att göra integrerade tolkningar av olika typer av data med fokus på de av SKB identifierade frågeställningarna.

### 2.2.3 Geologi

Programmet kommer sannolikt att inriktas på magmatiska och högmetamorfa bergarter. Målsättningen är att förvaret ska förläggas i en relativt homogen bergvolym. Det är viktigt både vid platsval och för säkerhetsanalyser att ha långtgående förståelse för diskontinuiteter i olika skalor, från storregionala deformationszoner till lokala sprick-system. Karakteriseringen av dessa med avseende på geometriska, mekaniska och hydrauliska egenskaper kräver väl utvecklade tolkningsmetoder.

Det är också av stor vikt att ha en god förståelse för övergripande geodynamiska processer såsom landhöjningen efter den senaste istiden, neotektoniska rörelser och naturlig seismicitet.

Målsättningen med programmet är att skapa en bättre förståelse för ett antal storskaliga geologiska och berggrundsstrukturella förutsättningar.

- litologisk och strukturell extrapolation i vertikalled
- tektonisk och seismisk påverkan på berggrunden
- kartläggning och tolkning av strukturgeologiska element
- datering av bergarter för att förstå den geologiska utvecklingen

### **Genomförande**

Arbetet kan genomföras inom ramen för ett antal delprojekt.

### **Geodetiska mätningar**

Med hjälp av ett GPS-nät (GPS = Global Positioning System) kan små rörelser mellan olika bergblock liksom pågående landhöjningstakt och aseismisk, horisontell töjning mätas. Detta kan vara mycket värdefullt för att lokalisera de aktiva svaghetszonerna i ett område, förutom att det bidrar till en ökad allmän förståelse av geodynamiska processer. Det nuvarande GPS-nätet i Sverige måste förmodligen utökas för att öka upplösningen kring tänkbara förvarsplatser. För att bestämma de horisontella töjningshastigheterna noggrant fordras sannolikt att data samlas in under minst tio år /2-40/.

### **Jordskalvsstudier**

Det svenska seismiska nätet för detektering och lokalisering av jordskalv har nysst utökats från sex till 18 stationer med ambitionen att utöka nätet med ytterligare 18 stationer. Denna täthet kommer att ge möjlighet att detektera och lokalisera jordbävningar med betydligt lägre magnitud än det tidigare nätet med sex stationer. Noggrannare bestämning av djup på jordskalven kommer att kunna utföras tack vare det tätare nätet. Det är också viktigt att fortsätta arbetet med att försöka förstå orsaken till uppkomsten av jordskalv inom den Baltiska skölden och den storskaliga mekaniska stabiliteten.

Inför en platsundersökning måste ett betydligt tätare, lokalt nät etableras, se avsnitt 2.2.9. Detta måste ske tidigt så att bakgrundstrender kan mätas. Övervakningen av jordskalv och planering av det täta lokala nätet blir viktiga kontinuerliga studier.

### **Datering av bergarter**

Moderna dateringsmetoder finns nu för att bestämma ålder på bergarter. Dessa dateringar är en mycket viktig komponent när det gäller att förstå den långsiktiga geologiska utvecklingen och de geologiska händelser som inträffat för mycket länge sedan. För att få en bättre kunskap om den geologiska utvecklingen vid tänkbara platser för ett förvar med djupa borrhål kommer dateringsmetoder att behöva användas. Inga nya metoder bedöms behöva utvecklas, men ett stort antal dateringar bör utföras och resultaten tolkas.

### **Ytseismik**

Reflektionsseismiska undersökningsmetoder (ekolodningar i berg) har utvecklats framgångsrikt i samband med platsundersökningsprogrammet för KBS-3. Dessa metoder kan även tillämpas på platsundersökningar för ett förvarskoncept med

djupa borrhål, men bör testas och eventuellt modifieras för de större undersökningsdjupen. Reflektionsseismiken ger främst information om geometrin för sprickzoner i berget samt bergartsgränser.

Refraktionsseismik tillämpas idag dels småskaligt inom anläggningsbranschen för att bestämma djup till berg och lokalisera sprickzoner, dels mycket storskaligt inom grundforskningen för att bestämma jordskorpans struktur (tjocklek cirka 40 km). För att på bästa sätt kunna utnyttja tekniken för djupintervallet ner till fem kilometer krävs utprovning och eventuellt vidareutveckling av tekniken. Refraktionsseismik ger information om de seismiska vågornas hastighet genom berggrunden, vilken i sin tur kan relateras till hur uppsprucket berget är.

### **Andra ytgeofysiska metoder**

Magnetiska och gravimetriska mätningar och tolkningar kommer att vara viktiga för att i första hand lokalisera en lämplig förvarsplats och senare genomföra detaljerade tolkningar. Tyngdkraftsmetoder får större betydelse i konceptet djupa borrhål än i KBS-3-konceptet, eftersom de har bättre möjligheter att detektera djupare strukturer än magnetiska metoder. Utveckling av tolkningsmetoder i 3D behövs.

## **2.2.4 Termiska processer**

Kunskapsläget när det gäller termiska processer har beskrivits i avsnitt 2.1.1. De temperaturgradienter som uppmätts i borrhål i den svenska kristallina berggrunden är relativt konstanta mot djupet /2-41/. Möjligheterna att beräkna den naturliga temperaturen på förvarsdjup bedöms vara goda. Man bör dock iaktta en viss försiktighet med denna typ av extrapolation då ytnära temperaturmätningar kan ge för låga gradienter genom påverkan av paleoklimat, grundvattenströmning eller brantstående bergartslager med olika värmeledningsförmåga /t ex 2-42/.

I och med deponeringen av det utbrända bränslet tillkommer en ny värmekälla genom att strålningsenergin från det radioaktiva sönderfallet omvandlas till värmeenergi. Denna uppvärmning kommer att pågå i tusentals år. Den värmevåg som genereras får egenskaper som beror på bergets värmeledningsförmåga och på effektutvecklingen i bränslet. Temperaturökningen kring de deponerade kapslarna leder till ett konvektivt vattenflöde, se avsnitt 2.2.5. Kunskap om vilken högsta temperatur som uppnås är även nödvändig för teknisk design.

Målsättningen med programmet är att:

- Kunna beräkna temperaturförhållandena på stora djup med god noggrannhet utgående från mätningar i grunda borrhål.
- Utveckla metodik för att simulera temperaturförhållandena på djupet före och efter deponering baserat på en modell av de litologiska, strukturella och hydrogeologiska förhållandena.
- Öka kunskapen om påverkan av temperatur och tryck på de termiska egenskaperna hos berggrunden



### **Genomförande**

Följande aktiviteter sker inom programmet:

- Detaljerade mätningar av temperatur i de djupa borrhålen. Utrustning för detta finns tillgänglig och ingen speciell utveckling krävs.
- Kopplade termo-hydrauliska beräkningar. Datorkoder finns som kan användas.
- Laboratiemätningar av bergets värmekonduktivitet under simulering av de tryck- och temperaturförhållanden som råder på stora djup.

## **2.2.5 Hydrauliska processer**

Kunskapsläget när det gäller grundvattenströmning har sammanfattats i avsnitt 2.1.2. Förståelsen för processen som sådan, med hänsyn till olika typer av drivande krafter, bedöms vara relativt god. Osäkerheten ligger främst i karakteriseringen av bergets storskaliga struktur, dvs innehållet av hydrauliskt aktiva större kontinuiteter. Få mätningar av hydrauliska egenskaper har utförts på de aktuella djupen och det är i princip omöjligt, även om detaljerade undersökningar utförs på en plats, att hydrauliskt karakterisera en bergmassa i stor skala i detalj. Prognoser av vattenförande strukturer, deras orientering och egenskaper blir därmed mycket osäkra, framförallt när det gäller att bedöma de storskaliga hydrauliska förbindelserna hos spricksystemet.

Datormodeller för att beräkna grundvattenflöden med hänsyn till temperatur och densitetsvariationer finns tillgängliga.

Programmet har följande målsättningar:

- Öka förståelsen av grundvattenflöde i stor skala.
- Undersöka vad som styr grundvattenströmningen i lokal skala kring ett förvar med djupa borrhål
- Öka kunskapen om vattenförande egenskaper hos berggrunden på stora djup.

### **Genomförande**

För att uppnå målen ska följande moment utföras:

- Studier av storskaliga grundvattenrörelser. Det är här viktigt att undersöka vilka lokala/regionala förhållanden, såsom närvaron av vattendrag och sjöar samt topografiska variationer, som påverkar strömningsbilden. Numeriska beräkningar är viktiga verktyg för denna typ av studier. För detta krävs ett bra dataunderlag vad avser den hydrauliska konduktivitetens variabilitet och djupberoende liksom salthaltens djupvariation. Denna typ av data erhålls från djupborrningarna.
- Paleohydrogeologiska studier. Grundvattenströmning påverkas av förändringar i klimat som sker under långa tidsrymder, framförallt istider, liksom av pågående landhöjning. Även om påverkan från framtida glaciationer främst erhålls på grundare djup, är paleohydrogeologiska studier väsentliga för förståelsen av det hydrogeologiska systemets utveckling i stort.

- Beräkning av grundvattenströmningen kring ett förvar som är byggt enligt konceptet djupa borrhål. Beräkningen ska ta hänsyn till variationer i salthalt, förvarets termiska utveckling samt den störda zon som kan förväntas uppkomma kring de djupa borrhålen.
- Detaljerad kartläggning av vattenförande sprickor i de djupa borrhålen samt mätningar av sprickornas naturliga tryck och vattenförande förmåga. Detektion av vattenförande sprickor kan ske med hjälp av detaljerade temperaturmätningar och mätning med olika flödesloggar. Om en annan borrhätska än vatten används vid borrhningen försvåras tolkningen av de hydrauliska testerna. Även gasinnehållet i grundvattnet på stora djup påverkar resultaten och gör dessa mer osäkra. Utveckling av testmetodik krävs.
- Undersökningar av den hydrauliska förbindelsen längs med borrhålen genom mätningar med multi-manschettsystem och spårämnesinjektioner.

## 2.2.6 Mekaniska processer

Kunskapsläget när det gäller mekaniska processer har sammanfattats i avsnitt 2.1.3.

Osäkerheterna ligger främst i kunskapen om de horisontella bergspänningarna på stora djup, förståelsen av den mekaniska och hydro-mekaniska påverkan av berget som uppkommer vid borrhning av stora, djupa hål och sambanden mellan spänning och deformation för skjuvning av stora sprickzoner, dvs den storskaliga stabiliteten på förvarsplatsen.

Spänningstillståndet är en av de mest kritiska faktorerna vid byggandet av förvaret. Framför allt kan en stor spänningsanisotropi innebära problem för de stora borrhålen. De spänningskoncentrationer som uppkommer kring det skapade hålrummet kan leda till att sprickor genereras i borrhålsväggen och kan fortplantas ut i berget. Bergutfall är vanligt i djupa borrhål. Vid en analys av förhållandena efter deponering måste hänsyn även tas till den spänningsförändring som uppkommer på grund av den termiska belastningen från bränslets radioaktiva sönderfall.

Skjuvning längs sprickor som korsar borrhålet kan uppkomma i samband med borrhningen antingen på grund av de ökade spänningarna eller genom hydro-mekanisk påverkan från höga vätsketryck.

Programmet har följande målsättningar:

- Erhålla utförliga data om in-situ spänningarna på stora djup
- Öka kunskapen om de laster som deponeringshålen kommer att utsättas för
- Kvalitativ och kvantitativ karakterisering av den störda zon som uppkommer genom borrhningen
- Öka förståelsen av brott- och deformationsmekanismer vid borrhålsväggen
- Öka kunskapen om borrhålens långsiktiga stabilitet
- Utveckla metodik för att bedöma hur jordskalv påverkar deponeringshålen

## **Genomförande**

För att nå målen ska följande moment utföras:

- Detaljerad utvärdering av nuvarande kunskap och erfarenheter av borrhålsstabilitet på stora djup.
- Mätning av de horisontella spänningarna med hydraulisk uppspräckning och hydrauliska tester på befintliga sprickor. Ett begränsat antal mätningar har utförts på de aktuella djupen och viss utveckling av fältutrustning kommer att krävas. Bl a har det visat sig svårt att med loggning eller avtrycksmanschett bestämma orienteringen på de sprickor som genereras vid uppspräckningen.
- Laboratiemätningar på upptagen borrhärna för att bestämma de spänningar som kärnan varit utsatt för på djupet. Ett antal olika metoder har föreslagits och provats men osäkerheterna i dessa metoder är fortfarande relativt stora. Utveckling av metodik krävs.
- Integrerad tolkning av resultaten av de hydrauliska mätningarna, observationer – alternativt avsaknad av observationer – av bergutfall och dragsprickor i borrhålsväggen samt olika typer av mätningar på borrhärnor för att härigenom erhålla bästa möjliga uppskattning av storlek och riktningar på huvudspänningarna.
- Analys av de mikrojordskalv som kan induceras i samband med borrhärning och hydrauliska tester. Stora framsteg har gjorts inom detta område /2-43/ men mer arbete återstår. Dessa passiva mätningar kräver ett tätt seismiskt nät.
- Bergmekanisk analys och modellering av brott och deformationer kring ett djupt deponeringshål före, under och efter deponering.
- Bergmekaniska laboratiemätningar av egenskaper hos intakt berg såväl som hos naturliga sprickor. Laboratoriesimulering av de tryck- och temperaturförhållanden som råder på aktuella förvarsdjup. Mätningar av temperaturutvidgningskoefficient.
- Studier liknande de som utförts för ett KBS-3-förvar /3-44/ av påverkan av jordskalv på ett förvar i djupa borrhär.
- Studier av kryprörelser i deponeringshål. Viss teoriutveckling krävs samt dessutom ingångsdata till de reologiska modeller som existerande teorier bygger på.

### **2.2.7 Kemiska processer**

Kunskapsläget när det gäller kemiska processer har sammanfattats i avsnitt 2.1.4. Generellt bedöms grundvattnet på de stora djupen vara nära stagnant med höga salthalter. Den främsta osäkerheten för förvarskonceptet djupa borrhär ligger i bedömningen av djupet till det salta vattnet på olika platser och förståelse för vad som orsakar lokala och regionala variationer. Dessutom krävs generella undersökningar av den kemiska miljön på stora djup, eftersom så få observationer finns idag.

Bakteriell aktivitet har dokumenterats ner till åtminstone 1 500 meters djup men är även fullt möjlig djupare ner. Det är viktigt att undersöka innehållet av gaser och kolloider i grundvattnet.

Programmet har följande målsättningar:

- Dokumentera de kemiska förhållandena på stora djup för att försäkra sig om att den kemiska miljön är gynnsam. Detta omfattar även att studera innehållet av kolloider och gas i grundvattnet, samt tolkning av gasernas ursprung (biogent/abiogent)
- Undersöka sambandet mellan grundvattenkemi och litologi på olika platser
- Öka förståelsen för de kemiska reaktioner som sker under rådande temperatur- och tryckförhållanden
- Undersöka grundvattnets salthaltsvariation med djupet och finna de olika källorna till höga salthalter
- Med utgångspunkt från vattenanalyser tolka blandningar av olika grundvattentyper och deras ursprung
- Med hjälp av de vattenkemiska tolkningarna belägga grundvattenflödesmodeller med avseende på långsamma förändringar
- Studera eventuella mikrobiella processer som sker på stora djup
- Undersöka vilken effekt det öppna, vertikalt kortslutande borrhålet har på de vattenkemiska förhållandena på djupet

### **Genomförande**

Vissa typer av undersökningar kan göras från markytan, såsom geoelektriska mätningar men merparten av de moment som ska genomföras bygger på provtagning i de planerade djupa borrhålen.

För att nå uppställda mål ska följande aktiviteter utföras:

- Ytelektriska mätningar. Med dessa kan man undersöka resistivitetsvariation mot djupet. En kombination av yt nära elektriska metoder (till exempel RMT) och metoder med större djupseende (Magneto Tellurics – MT och Controlled Source Audiofrequency Magnetotellurics – CSAMT) kommer att användas. De djupseende metoderna är väl utvecklade, men hittills har relativt få försök gjorts att tillämpa dem på de djupintervall som är av intresse för förvarskonceptet djupa borrhål. Genom att utföra undersökningar som fokuseras på detta djupintervall kan en databas med resultat byggas upp. Detta är mycket viktigt eftersom det då finns möjlighet att kartlägga gränsen till det mycket salta grundvatten (lägre resistivitet), som förväntas finnas på djupet.
- Mätning med geokemiloggar i samband med borrhningen.
- Provtagning i djupa borrhål. Kärna ska tas kontinuerligt i de djupa pilothålen (se avsnitt 2.2.9) vilket innebär att relevant information om de geologiska förhållandena på djupet erhålls direkt vid borrhningen. Emellertid krävs även annan provtagning. Exempelvis är kunskap om salthalten i vattnet som funktion av djupet mycket betydelsefull. Erfarenheter från tidigare utförda djupborrningar visar att det är viktigt, för att man ska få högkvalitativ information om vätskor och gas i berggrunden, att välja lämplig sammansättning på den borrhväska som används vid borrhningen. Likaså är det viktigt att prover på den cirkulerande borrhväska tas på ett korrekt sätt. Prover på naturliga vätskor i berget ska tas med lämpligt utformade testmetoder, för att säkra att proverna

kommer från välbestämda nivåer och att inte provernas kvalitet försämras under upptransporten till markytan. Utveckling av ett välplanerat provtagningsprogram är nödvändig innan borrningen sker. Dessutom krävs utveckling av en provtagningsutrustning som är kombinerad med en mätsond för pH, Eh och elektrisk konduktivitet.

- Geokemisk analys av material från kärna och borrhax. Isotopanalyser av sprickfyllnadsmineral ger viktig kunskap för tolkning av reaktioner mellan berg och vatten.
- Analys av kemisk sammansättning samt stabila och radiogena isotoper i grundvattenprover från olika djup.
- Integrerad tolkning av kemi- och isotopdata med multivariatanalys och modellberäkningar.
- Paleohydrogeokemiska studier är väsentliga för att förstå den geologiska och kemiska utvecklingen på en plats (se även 2.2.5).
- Analyser av innehåll av mikrober i prover från stora djup.

### 2.2.8 Transport i geosfären

Advektion, dvs transport med strömmande vatten, är normalt den viktigaste processen för transport av lösta ämnen i grundvattnet. På stora djup, där förhållandena ofta är stagnanta, kan den molekylära diffusionens betydelse öka. Den senare processen kan även innebära att vattenlösta ämnen, t ex radionuklider från eventuella skadade kapslar, kan diffundera in i mikrosprickor i berget, så kallad matrisdiffusion. Sorption är också viktig för transporten och innebär att radionuklider kan fastna på sprickornas och bergmatrikens yta alternativt på kolloidala partiklar eller mikrober. Vissa radionuklider kan även transporteras i gasfas.

Den advektiva transporten är beroende av grundvattenflödets storlek (se avsnitt 2.1.2 och 2.2.5), vilket beror på den drivande kraften och geosfärens vattenförande kapacitet. Förutom av de naturliga, ostörda förhållandena, påverkas processen av den konvektion som sker på grund av värmegenerering från det deponerade avfallet samt av skadezonen, dvs den uppsprickning som sker kring de djupa borrhålen.

Genom att olika flödesvägar leder vatten olika bra uppkommer hastighetsskillnader mellan olika flöden. Detta orsakar ett blandningsfenomen som kallas hydrodynamisk dispersion. För att kunna utvärdera resultaten av spårämnesförsök krävs modeller som tar hänsyn till advektion-dispersion.

Osäkerheterna kring advektion ligger framförallt i att beskriva den rumsliga variabiliteten i porstrukturens konduktivitet och flödesporositet (se avsnitt 2.2.5). En osäkerhetsfaktor för sorption är variabiliteten i grundvattenkemi. Dessutom finns det vissa osäkerheter i den konceptuella förståelsen. Eftersom sorptionen innebär en fördröjning av transporten, kan man emellertid oftast hantera osäkerheterna i en säkerhetsanalys genom att göra bedömningar med sämsta tänkbara fall som utgångspunkt. När det gäller matrisdiffusion finns osäkerheter både vad avser konceptualiseringen och svårigheter att verifiera resultat som har mätts upp på laboratorium under in situ-förhållanden.

Programmet har följande målsättningar:

- Undersöka betydelsen av jonbyte och sorption i salt grundvatten
- Öka förståelsen för olika transportmekanismer vid de förhållanden som råder på stora djup
- Öka kunskapen om transport i gasfas

### **Genomförande**

För att uppnå målen ska följande moment genomföras:

- Mätning av retentionsegenskaper hos sprickytor och bergmatris
- Transportmodellering med hänsyn till termisk konvektion, salthaltsvariationer och uppkommen uppsprickning kring de djupa borrhålen

## **2.2.9 Stegvis FUD-program**

Målsättningen med flerstegsprogrammet är att ta fram ett erforderligt geovetenskapligt underlag så att den befintliga konceptuella modellen av förhållandena ned till fem kilometers djup (se avsnitt 2.1.5) ska kunna verifieras och modifieras. Befintligt underlag utgörs av data från ett fåtal djupa borrhål samt ytbaserade undersökningar, och är inte tillräckligt utförligt och geografiskt täckande för att en fullständig bedömning av konceptet från bygghänsyn- och säkerhetsynpunkt ska kunna göras. Ett behov finns att borra ett antal djupa hål på utvalda platser och undersöka dessa noggrant. Det geovetenskapliga undersökningsprogrammet är nära kopplat till programmen med utveckling av borrhänsyn-, deponerings- och återtagsmetoder, se kapitel 3. Någon eller några av de platser som väljs för djupborrningar ska även användas för de senare programmen. De utvalda områdena ska därmed även uppfylla krav som ställs på dem med hänsyn till övriga faktorer i platsvalsprocessen.

### **Genomförande**

Programmet kan grovt indelas i tre steg:

Steg I: Känslighetsanalyser och val av undersökningsområden

Steg II: Borrning och geovetenskapliga borrhålsundersökningar

Steg III: Detaljundersökningar på en plats

Under steg I genomförs känslighetsanalyser med avseende på ett begränsat antal geovetenskapliga parametrar. Känslighetsanalyserna görs i form av en partiell säkerhetsanalys, se kapitel 5. Ett syfte med analyserna är att ge svar på frågorna om vilka geovetenskapliga förutsättningar som måste vara uppfyllda och vilka diskvalificerande faktorer som finns. En del av resultaten ska ligga till grund för platsval för undersökningar. Val av undersökningsområdena genomförs delvis parallellt med känslighetsanalyserna.

Behovet bedöms inledningsvis vara undersökningar i djupa borrhål på tre platser. Dessa undersökningar omfattar inom steg II borrhning (med kärna) av ett djupt borrhål (4–5 km) på varje plats och undersökningar i dessa hål. En tidsförskjutning mellan borrhningarna är önskvärd och nödvändig för att man ska kunna dra lärdom av gjorda erfarenheter. I programmet förutsätts förskjutningen vara ett år. Merparten av de geovetenskapliga undersökningarna utförs successivt i samband med borrhningen. Kompletterande undersökningar görs därefter i färdigt hål.

Olika typer av geovetenskaplig information sammanställs i en integrerad tolkningsmodell för varje plats för att ge svar på ställda frågor.

I steg III utförs på en av platserna, vald med hänsyn även till icke-geovetenskapliga faktorer, detaljundersökningar. Dessa omfattar borrhning av ytterligare två till fyra djupa hål på lämpliga avstånd från varandra och det befintliga hålet. Olika typer av mätningar (aktiva och passiva) utförs, både i enskilda hål och mellan hålen.

Nedan beskrivs olika typer av undersökningar inom de olika stegen mer i detalj. Merparten av dessa undersökningar kan sannolikt utföras med existerande teknik, men utveckling av metodik och rutiner krävs. I vissa fall krävs en mer omfattande utveckling av utrustning och/eller tolkningsmetoder. Detta utvecklingsbehov har beskrivits under respektive processavsnitt tidigare i detta kapitel.

### **Val av ett undersökningsområde**

Valet av områden där djupa undersökningsborrhål ska utföras sker i flera steg och omfattar följande moment:

1. Utgående från befintligt geologiskt och tektoniskt kartunderlag samt kompletterande översiktliga geologiska undersökningar lokaliseras ett område med lämpliga egenskaper. Detta område är av storleksordningen 15 km x 15 km.
2. Inom detta område görs ytundersökningar för att välja plats för det djupa borrhålet. Ytundersökningarna omfattar förutom mer detaljerad geologisk kartering även geofysiska undersökningar samt borrhning av ett antal grundare pilothål för att kalibrera ytgeofysiken och verifiera den framtagna geologiska och tektoniska modellen.

### **Undersökningar i och under borrhning av ett borrhål**

#### **Lokalt seismiskt nät**

Ett lokalt seismiskt nät upprättas i god tid innan borrhningen påbörjas för att kartlägga bakgrundstrender i seismiciteten. Förutom att bidra till förståelsen av den naturliga seismiciteten i området kan nätet användas för registrering av inducerad mikro-seismicitet under borrhning och i samband med hydrauliska injektionsförsök, exempelvis vid bergspänningsmätningar med hydraulisk spräckning. Erfarenheter visar att den registrerade seismiciteten kan ge värdefull information om spricksystemets geometri, sprickornas mekaniska egenskaper och bergspänningssituationen /2-11, 2-43/.

#### **Analys av borrhväska**

Under borrhningen kommer borrhväska kontinuerligt att provtas och analyseras på plats med avseende på gasinnehåll och kemisk sammansättning. Detta ger information om inflöden av grundvatten i borrhålet från bergmassan. Informationen är väsentlig med

hänsyn till både borrhningstekniska aspekter och geovetenskapligt informationsbehov. Förändringar i den kemiska sammansättningen kan leda till att borrhvatskan får andra egenskaper än de avsedda vilket kan resultera i borrhningsproblem. Djupintervall där ett inflöde detekteras – alternativt där ett utflöde av borrhvatska till berget sker – bör undersökas mer detaljerat genom loggning, analys av kärnprov etc.

### **Analys av borrhkax**

Kaxet, som består av söndermalt berg från borrhkronan, transporteras till markytan med borrhvatskan, och kan ge värdefull information. Inom oljeindustrin är det en standard att analysera borrhkaxet direkt i fält. Även om borrhkärna tas kontinuerligt, kan en kaxanalys ge en snabb överblick av bergarter och sprickzoner i borrhålet. Om det inte går att få upp någon borrhkärna för ett visst djupintervall, vilket kan vara fallet inom sprickzoner och på stora djup, får kaxanalyserna ännu större betydelse. En utveckling av kvalitets-säkrad metodik för kaxanalys krävs.

### **Kärnor**

Målsättningen är att ta kontinuerlig kärna vid borrhningen av undersökningshålen. Denna borrhsteknik beskrivs i kapitel 3. Vid sämre bergförhållanden kommer dock kärnförluster att uppkomma.

Uptagna kärnor används till tunnslipsanalys med XRD, geokemisk analys och olika bergmekaniska tester.

### **Hydrauliska mätningar**

Vid borrhningen erhålls spolvattenförluster vid passage av zoner med hög porositet och permeabilitet vilket ger en kvalitativ information om vattenförande egenskaper kring borrhålet. Inom vissa zoner kan råda ett övertryck vilket då resulterar i ett naturligt inflöde till borrhålet. Mätning av det naturliga porvattentrycket i avgränsade sektioner är viktig för att förstå den vertikala strömningsbilden och möjligheter till blandning av vätskor från olika nivåer.

Endast ett fåtal av de sprickor eller sprickzoner som observeras i kärnor eller detekteras med geofysiska loggar är vanligen vattenförande, vilket gör att direkta mätningar är nödvändiga. Detektering av vattenförande sprickor med olika typer av flödesloggar har använts i olika djupa borrhål med gott resultat. Mätningar med spinner tillsammans med manschetter har använts liksom metoder där man genererar en värmepuls. Korrekationer med hänsyn till djupvariationer i borrhålets tvärsnitt är nödvändiga för att erhålla goda resultat. Noggranna djupkalibreringar av olika loggar är viktiga när information från olika loggar ska korreleras.

In-situ-mätningar av transmissivitet och hydraulisk konduktivitet i djupa hål utförs vanligen antingen med så kallade drill stem tests (DST) i avmanschetterade sektioner av borrhålet eller injektionstester där en vatteninjektion av en viss längd följs av en återhämtningsperiod. Ett problem med olika typer av hydrauliska tester i dessa sammanhang är att de vätskor, ofta med hög densitet, som används vid borrhningen tränger ut i berget och stör de naturliga förhållandena. För en noggrann utvärdering av bergmassans hydrogeologiska parametrar måste testvätskans densitet och viskositet vara kända, vilket kan vara svårt att åstadkomma när formationsvätska blandas med borrhvatska. Det är önskvärt att om möjligt borra de vetenskapliga undersökningshålen med vatten.



För att undersöka flödesvägar längs med borrhålet krävs multimanschettssystem.

En fråga som är viktig att besvara vid platsundersökningarna är om det finns några brantstående vattenförande strukturer som kan fungera som potentiella transportvägar för radionuklider till markytan. När flera borrhål finns tillgängliga på en plats är det viktigt att försöka undersöka den hydrauliska interferensen mellan borrhålen.

### **Bergspänningsmätningar**

Bergspänningsmätningar med hydraulisk uppspräckning utförs i samband med borrhningen med hjälp av borrhigen. Mätningar på ytligare nivåer, liksom i omgivande grundare hål, kan utföras med wireline-system efter det att det djupa hålet färdigställts för att härigenom komplettera kunskapen om bergspänningssituationen på en enskild plats.

Laboratoriemätningar på kärna utförs liksom fokalmekanismanalys av eventuella inducerade och naturliga skalv. Se i övrigt avsnitt 2.2.6.

### **Provtagning av vätskor från berget**

Provtagning av naturliga formationsvätskor utgör en mycket viktig del av undersökningsprogrammet i borrhålen, se avsnitt 2.2.7. För att minimera kontaminerings effekter är det önskvärt att provtagning av naturliga vätskor i berggrunden sker i största möjliga utsträckning innan huvuddelen av de hydrauliska testerna utförs.

Ett provtagnings- och mätprogram kan ske i följande steg:

- Avbryta borrhningen vid förbestämda djup alternativt när en vattenförande spricka eller sprickzon indikeras.
- Logga den nya borrhålssektionen med flödeslogg.
- Installera provtagningsutrustning på borrhsträngen (antingen enkel- eller dubbelmanschett), inklusive geokemisond (pH, Eh, elektrisk konduktivitet).
- Sänka ned utrustningen till avsett djup, omsätta vattnet i sektionen två till tre gånger, mäta halten av spårämne från borrhvätskan, konduktivitet, pH och Eh och därefter genomföra provtagningen.
- Efter avslutat provtagning kan hydrauliska injektionstester utföras.
- När borrhningen till avsett djup avslutats, kan nya prov tas inom borrhålssektioner av speciellt intresse (identifierade genom provtagningen under borrhning).

### **Loggning**

Det finns ett välutvecklat sortiment av loggningsinstrument från oljeindustrin som kan användas för att undersöka de djupa borrhålen när borrhålsdiametern är större än cirka 20 centimeter. De loggar som är mest intressanta att utnyttja är:

- 4- eller 6-arms kaliper
- elektrisk bildtagning av borrhålsväggen
- akustisk bildtagning av borrhålsväggen
- kompressions (P)- och skjuvvågshastigheten (S)
- U, Th och K
- geokemi

- resistivitet
- susceptibilitet
- densitet
- temperatur
- borrhålsradar

Borrhålsradarn kommer sannolikt att behöva utvecklas vidare för att kunna användas i hål med större diameter och på de aktuella djupen.

### **Borrhålsseismik**

En viktig metod för att kalibrera ytseismiska undersökningar och detektera sprickzoner som inte skär borrhålet är VSP ("Vertical Seismic Profiling"). Mellanhålsseismik mellan flera djupa hål är nödvändig för att karakterisera bergvolymen. Borrhålsseismiska metoder är väl utvecklade inom oljeindustrin. För stora avstånd mellan borrhålen krävs viss utveckling av stora "downhole sources". Eventuellt sker en teknikutveckling så att vibrationerna från borrhålen kan användas som källor för reflektions- och tomografiska studier.

### **Referenser**

- /2-1/ Juhlin C, Wallroth T, Smellie J, Eliasson T, Ljunggren C, Leijon B & Beswick J The Very Deep Hole Concept – Geoscientific appraisal of conditions at great depth. SKB TR 98-05, Svensk Kärnbränslehantering AB, 1998.
- /2-2/ Milnes A G, Gee D G & Lund C-E Crustal structure and regional tectonics of SE Sweden and the Baltic Sea, SKB TR-98-21, Svensk Kärnbränslehantering AB, 1998.
- /2-3/ Juhlin C, Beckholmen M, Glushkov A & Rybalka A Geoscientific studies near and in the SG-4 superdeep borehole, Middle Urals, Russia, SKB U-96-43, Svensk Kärnbränslehantering AB, 1996.
- /2-4/ Juhlin C, Ayarza P, Beckholmen M, Friberg M, Glushkov A, Rybalka A & Pevzner L Geoscientific studies near and in the SG-4 superdeep borehole, Middle Urals, Russia, SKB U-97-25, Svensk Kärnbränslehantering AB, 1997.
- /2-5/ Balling N, Lind G, Landström O, Eriksson K G & Malmqvist D Thermal measurements from the deep Gravberg-1 well, Vattenfall R, D & D-report U(G) 1990/57, Vattenfall AB, 1990.
- /2-6/ Kukkonen I T Terrestrial heat flow and groundwater circulation in the bedrock in the central Baltic Shield, Tectonophysics, 156, 59-74, 1988.
- /2-7/ Boulton G S, Caban P & Hulton N Simulations of the Scandinavian ice sheet and its subsurface conditions, SKB R-99-73, Svensk Kärnbränslehantering AB, 1999.
- /2-8/ Svensson U SKB Palaeohydrogeological programme, Simulations of regional groundwater flows, as forced by glaciation cycles, SKB U 96-36, Svensk Kärnbränslehantering AB, 1996.

- /2-9/ Voss, C & Andersson J Regional flow in the Baltic Shield during Holocene coastal regression, *Ground Water*, 31, 989-1040, 1993.
- /2-10/ Reh binder G, m fl On regional flow in the Baltic Shield – An application of an analytical solution using hydrogeologic conditions at Aberg, Beberg and Ceberg of SR97, SKB Report R-97-17, Svensk Kärnbränslehantering AB 1997.
- /2-11/ Wallroth T Very Deep Hole Concept, Geoscientific appraisal to conditions at large depths – Hydrogeology, SKB Progress Report U-96-09, Svensk Kärnbränslehantering AB, 1996.
- /2-12/ Clauser C Permeability of crystalline rocks, *EOS*, 26 May, 1992
- /2-13/ Durham W B & Bonner B P Self-propping and fluid flow in slightly offset joints at high effective pressures. *J Geophys Res*, 99, 9391-9399, 1994.
- /2-14/ Juhlin C Seismic attenuation, shear wave anisotropy and some aspects of fracturing in the crystalline rock of the Siljan Ring area, central Sweden, PhD thesis, University of Uppsala, 1990.
- /2-15/ Moos D & Zoback M D In situ studies of velocities in fractured crystalline rock, *J Geophys Res*, 88, 2345-2358, 1983.
- /2-16/ NEDRA Characterisation of crystalline rocks in deep boreholes, The Kola, Krivoy Rog and Tyrnauz boreholes, SKB Technical Report TR 92-39, Svensk Kärnbränslehantering AB, 1992.
- /2-17/ Swan G The mechanical properties of Stripa granite, Swedish-American cooperative program on radioactive waste storage in mined caverns in crystalline rock, Technical Report 3, 1978.
- /2-18/ Jamison B & Cook N G W An analysis of measured values for the state of stress in the Earth's crust, Lawrence Berkeley Laboratory, California, LBL-7071, SAC-07, 1978.
- /2-19/ Leijon B Mechanical properties of fracture zones, SKB Technical Report TR-93-19, Svensk Kärnbränslehantering AB, 1993.
- /2-20/ Scholz C H The mechanics of earthquakes and faulting, Cambridge University Press, 1990.
- /2-21/ Evans K F, Cornet F H, Hashida T, Hayashi K, Ito T, Matsuki K & Wallroth T Stress and rock mechanics issues of relevance to HDR/HWR engineered geothermal systems: review of developments during the past 15 years, *Geothermics*, 28, 455-474, 1999.
- /2-22/ Lund B & Zoback M D Orientation and magnitude of in situ stress to 6.5 km depth in the Baltic Shield, *Int J Rock Mech Min Sci*, 36, 169-190, 1999.
- /2-23/ Ljunggren C & Persson M Beskrivning av databas – Bergspänningsmätningar i Sverige, SKB Project Report PR D-95-017, Svensk Kärnbränslehantering AB, 1995.
- /2-24/ Ljunggren C & Leijon B Geoscientific appraisal to conditions at large depths – geomechanics, SKB Project Report U-96-31, Svensk Kärnbränslehantering AB, 1996.

- /2-25/ Slunga R The Baltic Shield earthquakes, *Tectonophysics*, 189, 323-331, 1991.
- /2-26/ Muir Wood R A review of the seismotectonics of Sweden, SKB Technical Report TR-93-13, Svensk Kärnbränslehantering AB, 1993.
- /2-27/ Nurmi P A, Kukkonen I T & Lahermo P W Geochemistry and origin of saline groundwaters in the Fennoscandian Shield, *Applied Geochemistry*, 3, 185-303, 1988.
- /2-28/ Frapé S K, Byrant G, Blomqvist R & Ruskeeniemi T Evidence from stable isotopes for multiple sources of chloride in groundwaters from crystalline shield environments, In: *Isotopes in Water Resources Management (IAEA-SM-336/24)*, IAEA, Vienna, March 1995.
- /2-29/ Pearson F J Models of mineral controls on composition of saline groundwaters of the Canadian Shield, *Geol Assoc Can Spec Pap*, 33, 39-52, 1987.
- /2-30/ Raven K G & Clark I D Survey of geoscientific data in deep underground mines in the Canadian Shield, *Atomic Energy Contr Board*, 92-012, 1993.
- /2-31/ Ruskeeniemi T, Blomqvist R, Lindberg A, Ahonen L & Frapé S Hydrogeochemistry of deep groundwaters of mafic and ultramafic rocks in Finland, *Posiva OY Tech Rep (96-21)*, Posiva Oy, 1996.
- /2-32/ Fritz P & Frapé S K (eds) Methane in the crystalline rocks of the Canadian Shield, Vol Special Paper 33, *Saline water and gases in crystalline rocks*, Geological Association of Canada, 1987.
- /2-33/ Pedersen K & Ekendahl S Distribution and activity of bacteria in deep granitic groundwaters of southeastern Sweden, *Microbial Ecology*, 20, 37-52, 1990.
- /2-34/ Pedersen K & Ekendahl S Assimilation of CO<sub>2</sub> and introduced organic compounds by bacterial communities in groundwater from southeastern Sweden deep crystalline bedrock, *Microbial Ecology*, 23, 1-14, 1992.
- /2-35/ Pedersen K & Ekendahl S Incorporation of CO<sub>2</sub> and introduced organic compounds by bacterial populations in groundwater from the deep crystalline bedrock of the Stripa Mine, *J Gen Microbiol*, 138, 369-376, 1992.
- /2-36/ Kaiser J Can deep bacteria live on nothing but rocks and water. *Science*, 270, 377, 1995.
- /2-37/ Juhlin C & Sandstedt H Storage of nuclear waste in very deep boreholes. Feasibility study and assessment of economic potential, SKB Technical report TR-89-39, Svensk Kärnbränslehantering AB, 1989.
- /2-38/ Sundqvist, S Near-surface seismic events in Sweden, 1980-1992, SKB Project Report PR-D-95-015, Svensk Kärnbränslehantering AB 1995.
- /2-39/ Wahlström, R Near surface earthquakes in the Baltic Shield, notably Sweden, *Tectonophysics*, 68, 31-35, 1980.
- /2-40/ Scherneck H-G, Johansson J M & Elgered G Application of space geodetic techniques for the determination of intraplate deformations and movements in relation with the postglacial rebound of Fennoscandia, SKB Technical Report TR 96-19, Svensk Kärnbränslehantering AB, 1996.

- /2-41/ Ahlbom K, Olsson O & Sehlstedt S Temperature conditions in the SKB study sites, SKB Technical Report TR-95-16, Svensk Kärnbränslehantering AB, 1995.
- /2-42/ Kohl T & Rybach L Thermal and hydraulic aspects of the KTB drill site, Geophys. J. Int., 124, 756-772, 1996.
- /2-43/ Niitsuma H, Fehler M, Jones R, Wilson S, Albright J, Green A, Baria R, Hayashi K, Kaieda H, Tezuka K, Jupe A, Wallroth T, Cornet F, Asanuma H, Moriya H, Nagano K, Phillips W S, Rutledge J, House L, Beauce A, Alde D, Aster R Current status of seismic and borehole measurements for HDR/HWR development, Geothermics, 28, 475-490, 1999.
- /2-44/ LaPointe P, Wallmann P, Thomas A & Follin S A methodology to estimate earthquake effects in fractures intersecting canister holes, SKB Technical Report TR 97-07, Svensk Kärnbränslehantering AB, 1997.

## 3 Teknik

Avsnittet omfattar teknisk utveckling av de system och anläggningar som behövs för förvarskonceptet djupa borrhål. Kapsel-fabrik och transporter tas inte upp i detta sammanhang, eftersom dessa system liknar KBS-3-konceptets.

### 3.1 Inkapsling av använt bränsle

Inkapslingsprocessen beror av om bränslet är konsoliderat eller inte. Skillnaderna mot inkapsling enligt KBS-3-konceptet är störst när bränslet är konsoliderat. Konsolidering innebär att bränslestavarna skiljs från den strukturella matrisen, som består av bland annat boxar och spridare. De enskilda bränslestavarna placeras i en behållare som när den blivit fylld försluts och lyfts ner i kapseln som också den försluts.

Tekniskt sett är detta en genomförbar metod som idag används i olika omfattning i exempelvis USA och Tyskland. Hanteringen är emellertid komplicerad med många olika steg. Metoden att mekaniskt sortera upp respektive bränsleelement i deras olika huvudkomponenter är tidskrävande och sannolikheten för driftstopp är stor i förhållande till om bränslet inte konsolideras.

Om bränslet inte är konsoliderat blir likheterna med inkapsling enligt KBS-3-metoden större. Då hanteras bränsleelementen som de är, placeras i kapseln varpå omgivande utrymme fylls och kapseln försluts. Om kapseln är av titan, såsom är fallet i ett av de kapselalternativ som föreslås i PASS-rapporten /3-1/, fylls tomrummet med betong.

Om BWR-bränslet lyfts ur bränsleboxarna före inkapsling kan kapslarna göras något kortare vilket troligen medför att borrhålet utnyttjas bättre. Nackdelen är dock att boxarna måste tas om hand i en separat process. Om kompakterade boxar måste placeras i egna kapslar är det tveksamt om volymbesparingen totalt sett blir så stor. PWR-bränsle är oboxat.

#### 3.1.1 Inkapslingsanläggning

Den inkapslingsanläggning som SKB utvecklat för kopparkapseln enligt KBS-3-konceptet ligger antingen vid CLAB eller vid djupförvaret. Anläggningsutformningen går att anpassa till kapslar av annan storlek och av annat material. Betongingjutning av hårdkomponenter planeras ske vid inkapslingsanläggningen. Att fylla kapslar med betong bör kunna ske på likartat sätt.

En KBS-3-kapsel per arbetsdag ska kapslas in. Eftersom antalet bränsleelement är avsevärt färre i en kapsel för djupa borrhål jämfört med KBS-3-kapseln måste produktionshastigheten minst fördubblas för att den totala inkapslingstiden inte ska förlängas. Detta kräver parallella linjer i anläggningen.

De största anläggningsändringarna jämfört med den hittills projekterade inkapslingsanläggningen berör hanteringscellens utformning. Byggnadsvolymen ökar också, eftersom antalet kapslar som hanteras parallellt fördubblas. Även antalet transporter och därmed också antalet transportbehållare kommer troligen att öka.

Om bränslet ska konsolideras måste väsentliga delar av inkapslingsanläggningen helt omprojekteras. Där bränslet förs in i anläggningen placeras en konsolideringscell (het cell). I denna del dras de enskilda bränslestavarna ut ur den fysiskt sammanhållande matrisen. Matrisen som huvudsakligen består av bränslebox (endast BWR), spridare samt topp- och bottenplatta kompakteras. Bränslestavarna torkas och placeras sedan i en bränslebehållare. När behållaren är fylld monteras ett lock på den varefter den lyfts ner i en kapsel. Kapseln lämnar hanteringscellen i en mobil strålskärmad lastbärare. Vid den efterföljande betongfyllningen fylls utrymmet mellan bränslebehållaren och höljet. Betongytans övre del planas av innan locket svetsas fast.

För icke konsoliderat bränsle räcker det att utvidga hanteringscellen i inkapslingsanläggningen så att minst två kapslar kan hanteras och fyllas med bränsle parallellt, d v s arbetet bedrivs i två linjer. Om det rör sig om en titankapsel förs denna till betongfyllningsstationen där bränsleelementen gjuts in i betong. Betongytans övre del planas av innan locket svetsas fast.

#### **Behov av utveckling/analyser:**

- kapselutformning, se avsnitt 4.2
- förslutningsteknik
- oförstörande provning
- revision av hela anläggningens layout innehållande:
  - analys av produktionskapaciteten
  - analys av logistik med hänsyn till antalet transporter
  - betongkvalitet (täthet, luftfickor)
  - teknisk konstruktionslösning av lyftanordningen på kapseln (deformations- och korrosionsrisk med hänsyn till återtagbarhet)
  - belastningsberäkningar
- kriticitetsanalys vid inkapsling
- safeguards

### **3.1.2 Återtag av bränsle**

Att återföra kapslarna till inkapslingsanläggningen och där ta ut bränslet för att t ex lagra det i CLAB igen kan bli mer komplicerat än i KBS-3-fallet, beroende på hur kapseln har konstruerats och fyllts. Konsoliderat bränsle är möjligt att återta, eftersom bränslestavarna ligger i en separat behållare som skiljer stavarna från ingjutningsmaterialet. Kapselns övre del avskiljs mekaniskt varefter bränslet kan lyftas ut, stav för stav. Stavarna kan placeras i särskilda kassetter för att underlätta vidare hantering.

Icke konsoliderat bränsle kan endast med svårighet återtas ur en titanbehållare som fyllts med betong. Det går inte att skilja stavarna från ingjutningsmaterialet på något enkelt sätt. Rent principiellt kan bränslekutsarna sannolikt separeras mekaniskt från betongen, men detta är en komplicerad process som dessutom leder till att utrustning och anläggning blir mycket kontaminerad. Om däremot kapselns hållfasthet är garanterad på annat sätt än genom betongfyllning blir situationen mer lik den för KBS-3.

### **Behov av utveckling/analyser:**

- anläggningsutformning av inkapslingsanläggningen för återtag
- anläggningsutformning av CLAB för återtag
- transporter av återtaget material
- förvaring av återtaget material
- safeguards
- kriticitet

## **3.2 Borrning**

Under det senaste decenniet har man inom oljeindustrin gjort stora framsteg när det gäller att borra djupa hål. De flesta av dessa har dock gjorts i sedimentära bergarter. Nyligen har emellertid ett över nio kilometer djupt hål borrats i Tyskland i kristallin berggrund /3-2/.

Något djupt hål med så stor diameter som 800 millimeter har aldrig borrats. Ett tekniskt problem som vi kan förutse vid borrning av 800 millimeter vida hål till fyra kilometers djup är att få erforderlig energi nedförd till borrhuvudet. Den tidigare gjorda bedömningen /3-1/ att djupa hål borrar med en metod som använder cirkulerande vätska för att föra ner energi till borrhuvudet och för att föra upp borrhax står sig även idag, men måste utredas vidare.

Ett annat problem är att få hålet tillräckligt rakt. Rakheten är viktig och den mest korrekta styrningen fås med stora hål. På senare år har mera effektiva, automatiserade borrhjugg tagits fram. Styrtekniken är idag så bra att det är möjligt att borra pilothål med en diameter av 311 millimeter med stor precision. Det tidigare nämnda djupa hålet i Tyskland är ett exempel på detta. Där var avvikelserna i vertikalled bara 1–2° ner till 7 000 meters djup. Ytterligare utveckling bör emellertid ske av borrhuvuden som är särskilt effektiva i granit och som ger möjlighet att borra vertikalt. Möjligheten att utföra pilothål som vidgas till slutlig, önskad diameter bör också utredas, eftersom pilothålen ger de bästa förutsättningarna för att karakterisera berget. Undersökning i pilothål kräver emellertid att detta borrar utan infodring, vilket ställer krav på de bergmekaniska förhållandena.

Den ökade omfattningen av oljeprospektering på stort djup har resulterat i större håldiametrar och starkare borrhjugg. Användningen av 168 millimeters borrhjugg är så gott som standard vid djupa oljeborrningar inom vissa fält. Borrhjuggarna är förmodligen inte någon begränsning för borrning av djupa hål med så stor diameter som det här är frågan om.

Följande delobjekt bör undersökas i separata eller integrerade forskningsprojekt:

- Utformning av borrhjugg och borrhuvud (i samverkan med brittisk, tysk och rysk expertis)
- Drivning av borrhuvud
- Utförande av borrhål i representativt berg



- 1) 10 meter djupt pilothål i Äspö för förförsök, 2) ett eller två pilothål (ca 300 mm hål till 2–4 km djup). Dessa djupa pilothål förutsättes ingå i det geovetenskapliga borrhprogrammet.
- Upprymning av pilothål till fullstor diameter (800 mm till 4 km djup)

Möjligheten att få stabila borrhål bestäms praktiskt taget helt av spänningstillståndet i berget och bergets hållfasthet. Hållfastheten påverkas i hög grad av förekomsten av lokala sprickor eller svaghetsplan, jämför avsnitt 2.1.3. Ju större håldiametern är desto större är risken för att hålet träffar de svaghetsplan som medför instabila väggar, vilket i sin tur kan resultera i att borrhålet rasar in under borrhning. Seismiska aktiviteter skapar dynamiska rörelser som kraftigt ökar risken för att borrhålet rasar in eller för rörelser i sprickplan som borrhålet går igenom. Besvärliga spänningsförhållanden kan motverkas genom att välja en lämplig borrhväska med en sådan täthet som leder till stabila förhållanden. Om däremot polymerbaserade borrhväska används kommer bottenstrycket att bli lägre än det hydrostatiska trycket och borrhålväggarna därigenom instabila. Fördelen är att det går snabbare att borra.

I det borrhade hålet installeras, så tidigt som möjligt, ett foder som utformas för att stabilisera bergväggen och hålla hålet öppet.

Ett bra val av borrhmetod och robust utformning av stabiliserande konstruktioner kräver analyser av de spänningsförhållanden som råder och den hållfasthet berget har, liksom av förekomsten av svaghetszoner och den roll dessa spelar i berget. Kunskaperna om berget tas fram i det program som beskrivs i kapitel 2. Utöver dessa måste programmet kompletteras med frågor som rör själva analysen.

- Tillämpning och utveckling av metoder för beräkning av statiska och dynamiska spänningstillstånd med den strukturella och mekaniska modell för berget som det geovetenskapliga arbetet redovisar

### 3.2.1 Stabilisering av borrhål

För att kunna stabilisera hålet måste borrhväskaans kvalitet ibland bestämmas inom snäva intervall. Om densiteten är för låg orkar inte vätskan stå emot bergspänningarna och väggarna kan rasa in. Är densiteten däremot för hög kan befintliga sprickor vidgas och vätskan försvinna ut i berget.

Smektitiska borrhväskaor kan användas vid borrhning av djupa borrhål. Speciella tillsatser kan behövas, men om borrhväska ska ersättas av en deponeringsslurry har dessa sannolikt ingen betydelse. Om borrhväska ska vara densamma som deponeringsslurryn finns det emellertid skäl att beakta tillsatserna. Alternativ till smektitiska borrhväskaor finns. Det tyska oljeborrhningsföretaget Deutag förordar en polymerbaserad sort för att borrhningshastigheten ska bli tillräckligt stor /3-2/, men en organisk borrhväska medför kemiska problem i ett djupförvar. Dessa behöver analyseras inom ramen för säkerhetsanalysen. Organiska borrhväskaor medför också, som tidigare nämnts, att borrhålväggen blir i det närmaste utan mekaniskt stöd till dess att infodringen kommer på plats.

I konceptet djupa borrhål har smektitiska borrhväska en positiv inverkan genom att de tränger ut i sprickor i berget närmast borrhålet och tätar dessa. Vid oljeborrning observeras detta ofta men utgör där ett problem, eftersom täta borrhålsväggar gör det svårare att komma åt oljan.

Ett flertal insatser måste göras:

- Bestämning av borrhväskaens ideala typ, sammansättning och täthet med avseende på borrhålsstabilitet, förmåga att transportera borrhväska och förmåga att ersättas av deponeringslurry.
- Utredning om deponeringslurryn kan användas som borrhväska.
- Definition av de reologiska egenskaperna hos alternativa borrhväska.
- Praktisk provning i form av små- och halvskaliga hålborrhningar i Äspö och fullskalig provning i samband med borrning av pilothål.

### 3.2.2 Bortteknisk utveckling

Tillgången till automatiserade borrhningar med effektivare drivning av borrhuvudet och större pumpkapacitet och med långt driven rationalisering av hanteringen av borrhväska gör konceptet djupa hål i dess aktuella form mer realistiskt än vid tidigare bedömningar. För förvaring i djupa borrhål kan man rekommendera en ytterligare utveckling av borttekniken så att skilda borrhningar konstrueras och används för borrning och för applicering och återtag. Det finns behov av att närmare utreda möjligheten att använda luftdrivna system och hammarbortteknik som redan idag kan användas för borrning av hål med en meters diameter.

Borrhväska som är särskilt effektiva i granit bör utvecklas. Här kan så kallade cluster-system med flera motorer eller turbiner för snabb borrhningshastighet och möjlighet att borra vertikalt vara lämpliga. Pilothål som vidgas till slutlig önskad diameter har prövats vid oljepropektering. Det återstår emellertid att finna lämpliga förfaranden för att åstadkomma vidgningen i kristallint berg. Teknik för att borra rakt och vertikalt har prövats och dokumenterats för mycket djupa hål [3-2]. För konceptet djupa borrhål krävs ytterligare utveckling.

Hydraulisk karakterisering av berget i samband med borrhningen har tillämpats som standard vid oljepropektering i sedimentärt berg. I kristallint berg kan svårigheterna vara större och man bedömer att de bästa förutsättningarna finns vid pilothålsborrnig med vatten eller tunna polymerer som borrhväska, eftersom de inte sätter igen permeabla zoner.

En viktig insats är att utveckla en lämplig borrhväska. Detta kräver omfattande forskning och utveckling som möjligen kan leda till att man kan använda en borrhväska som också kan fungera som deponeringslurry. Borrhväska bör ha tixotropa egenskaper och vara måttligt viskös vid relativt hög täthet. Palygorskitbaserad borrhväska har använts under lång tid i före detta Sovjetunionen. Dess betydande tixotropi, hållfasthet och svällningstryck gör den intressant som borrhväska, särskilt genom att fiberstrukturen hindrar den från att tränga in i sprickor. Den skulle också kunna fungera som huvudkomponent i deponeringslurry. Ett alternativ är blandlagerlera av typ Friedland Ton, vars hydrauliska konduktivitet bedöms vara mindre beroende av porvattnets salthalt än montmorillonitler av Wyoming-typ. Friedland Ton har i Tyskland använts som borrhväska vid borrhning ner till en kilometers djup. Större djup antas inte vara något hinder.

Följande utvecklingssteg är viktiga:

- Upprättande av djupborrningsprogram
- Utveckling av optimal borrhsteknik med avseende på drivningssätt, borrhuvud, borrhväska och anordningar för raket och vertikal orientering
- Utveckling av nya bergkarakteriseringsmetoder (pilothål, mätteknik)

### 3.3 Deponering

#### 3.3.1 Deponeringsslurry – konsistens och processer

Deponeringsslurryn måste kunna ersätta borrhväska eller alternativt kunna fungera som borrhväska. Det måste också vara möjligt att trycka ned kapslar och bentonitblock i slurryn, vilket förutsätter relativt låg täthet. Deponeringsslurry med densiteten 1 500 kg/m<sup>3</sup> skulle möjligen kunna fungera också som borrhväska. För att slurryn ska fungera acceptabelt som buffert runt kapslar bör dess täthet minst vara cirka 1 500 kg/m<sup>3</sup>. Laboratieförsök som utförts nyligen antyder att tätheten eventuellt kan höjas upp till 1 750 kg/m<sup>3</sup> utan att det blir omöjligt att trycka ner kapslar och block.

Vattenmättnaden och homogeniseringen av bentonitblocken mellan kapslarna och deponeringsslurryn innebär att blocken sväller och slurryn konsoliderar enbart i radiell led. Förhållandet att den stora håldiametern ger stor bentonitmängd leder till att tätheten blir gynnsamt hög, upp mot 1 900 kg/m<sup>3</sup>. Homogeniteten blir god och isoleringsfunktionen därför mycket bra, särskilt om deponeringsslurryn kan ges högre täthet. De detaljerade processerna vid homogeniseringen måste analyseras noggrant för att slurryn ska få lämplig sammansättning och densitet.

I kontakten med deponeringsdelen av hålet på två kilometers djup ger egentyngden och svällningstrycket upphov till en belastning på buffert/kapselsystemet som tenderar att pressas nedåt. Uppåt verkar svällningstrycket 1,5–2 MPa men lyftkraften motverkas av väggfriktionen. Nettokraften, som kan vara flera tiotals ton, kräver ett effektivt mothåll i hålets översta ända. Enligt konceptet /3-1/ ges detta av en 50–100 meter lång betongplugg. Frågorna kring kraftspelet i ett djupt hål i samband med appliceringen av deponeringsslurry och kapslar måste utredas.

Följande insatser måste göras:

- Definition av de erforderliga reologiska egenskaperna hos deponeringsslurryn för att den ska kunna ersätta borrhväska
- Definition av den ideala sammansättningen och konstitutionen hos deponeringsslurryn för att uppfylla kraven att den ska vara tillräckligt lös för att kunna ersätta borrhväska eller fungera som borrhväska och medge nedtryckning av kapslar och bentonitblock, och samtidigt ha låg hydraulisk konduktivitet och hög skjuvhållfasthet. Arbetet inkluderar systematiska geotekniska laboratorieundersökningar för att bestämma svällnings- och konsolideringsegenskaper, skjuvhållfasthet och krypegenskaper

- Utredning och modellering av kraftspel och interna rörelser i deponerings-slurryn vid applicering och efterföljande vattenmättnad och homogenisering
- Praktisk provning i form av små- och halvskaliga försök i Äspö och fullskalig provning i hål borrade ner till fyra kilometers djup

### 3.3.2 Applicering av deponeringsslurry

Deponeringsslurryn ska enligt konceptet i /3-1/ ske genom att slurryn pressas ut från i borrhvatskan nedförda behållare. Detta bör vara möjligt, men den erforderliga tekniken är inte definierad och måste prövas. Pumpning från markytan anses också vara möjlig med numera tillgänglig utrustning och utgör ett möjligt alternativt förfarande.

Följande insatser måste göras:

- Design av utrustning för anbringande av deponeringsslurry (pumpar, rörsystem, tankar)
- Tillverkning av prototyp för provning i laboratorieskala och i små- och halvskaliga försök i Äspö och fullskalig provning i hål borrade till fyra kilometers djup
- Utveckling av numerisk modell för slurryflödet vid ersättning av borrhvatska

### 3.3.3 Applicering av kapslar och bentonitblock

Kapslar och bentonitblock kan tryckas ned i deponeringsslurryn. Laboratorieförsök i laboratorieskala bekräftar att detta är möjligt t o m vid högre täthet än  $1\,500\text{ kg/m}^3$ . Detta måste prövas i större skala för att kunna verifieras. Vidare finns ett stort antal riskmoment kopplade till deponeringen. Dessa måste identifieras systematiskt för att kunna beaktas vid själva utformningen av deponeringsprocessen. Om riskmomenten inte kan elimineras genom utformning, måste de beaktas i säkerhetsanalysen.

Följande insatser måste göras:

- Design av teknik för anbringande av bentonitblock och kapslar.
- Tillverkning av en prototyp för provning i laboratorieskala och i små- och halvskaliga försök i Äspö och fullskalig provning i deponeringshål borrarat till fyra kilometers djup.
- Utveckling av en numerisk modell för slurryflödet vid applicering av block och kapslar med särskild hänsyn till funktionen hos bergstödjande foderrör.
- Optimering av systemet med hopfogade strängar av kapslar och bentonitblock beträffande deras antal och längd
- Genomgång av felfunktioner och utvärdering av hur de kan åtgärdas eller vilka konsekvenser de kan få.

### 3.3.4 Radiologiska frågor vid deponering

Driften vid ett förvar av typen djupa borrhål innebär mottagning och deponering av kapslar med det använda kärnbränslet. Kapslarna hanteras i strålskärmade behållare. När de lyfts ur behållarna för att deponeras kan all hantering ske fjärrstyrt med operatören på behörigt avstånd. Radioaktiva partiklar ska inte kunna spridas, eftersom kapslarnas integritet bevaras under de missöden som eventuellt kan uppstå.

#### ***Strålskydd och stråldos till personal***

Dosbelastning till personalen som arbetar vid förvaret härrör från olika moment i hantlingskedjan från mottagningen av transportbehållarna till deponeringen i det djupa borrhålet. Vid normal drift förväntas hanteringen inte ge något bidrag till personalens dosbelastning. Enstaka incidenter eller underhåll och reparationer kan leda till märkbart förhöjda kollektivdoser. Detta motverkas dock så långt möjligt genom temporära strålskärmar.

#### ***Störningar och missöden***

Händelser som avviker från normal drift indelas i störningar, som kan inträffa någon gång och missöden, som bedöms vara osannolika.

Exempel på störningar är:

- fel i hanteringssystemet
- brand
- fel i försörjningssystemet av el, tryckluft etc.

Strålproblem uppstår om dessa störningar inträffar när kapseln fortfarande befinner sig på markytan och någon form av handgriplig åtgärd krävs för att komma tillrätta med problemet. Fungerar inte detta behöver kapseln avskärmas så effektivt som möjligt. Många fel torde kunna avhjälpas utan att personalen utsätts för ökad strålrisk. Ingen radioaktiva ämnen sprids i luften så länge kapseln är hel.

Har kapseln börjat deponeras skyddar redan någon meter deponeringsvätska mot strålningen. Strålningsrisk uppstår först när kapseln kommer upp i dagen. Kapseln bör då kunna skyddas om inte fjärrstyrningen kan användas. Sannolikheten för att en störning ska kunna bryta kapselns integritet är mycket låg. En sådan händelse nere i det djupa borrhålet kan dock leda till allvarigare problem om radioaktiva ämnen kommer ut. Kapseln kan tas upp till markytan och hanteras i ett strålskydd runt deponeringshålets mynning medan deponeringsvätskan kanske måste bytas ut. Det kan vara svårt att nå totalt strålskydd i den hanteringen.

Exempel på missöden är:

- tappad last
- kollisioner
- vältande fordon
- brand

Tappad last eller kollisioner leder i sämsta fall till skador på kapselns yta, men inte till att kapselns integritet hotas. Lyfthöjder och hastigheter hos fordon ska hållas under de gränser som leder till allvarigare konsekvenser om olyckan är framme. Likaså kan konsekvensen av att ett fordon välter förebyggas genom att kapseln eller transportbehållaren är tillräckligt kraftig. Dock måste en kapsel som utsätts för ett av dessa missöden kon-

trolleras noggrant och, om så bedöms nödvändigt, återförs till inkapslingsanläggningen för en detaljerad inspektion.

Transportbehållaren utformas för att klara brand. Lång och kraftig brand med kapseln i deponeringsläge kan kanske inte motverkas genom skydd fullt ut. Kapseln riskerar då att skadas på ytan och måste transporteras tillbaka till inkapslingsanläggningen för åtgärder. Integriteten får dock ej äventyras. Strålriskerna uppstår vid hanteringen av kapseln innan den befinner sig inne i transportbehållaren samt i inkapslingsanläggningen. Sannolikheten för en sådan brand är dock mycket liten.

En tappad kapsel i ett borrhål kan, med idag känd teknik, greppas och firas upp till markytan. Deponeringsvätskan har sådan täthet att kapseln sjunker mycket långsamt. Något fall med hög hastighet som kan skada kapseln är inte möjligt. Därmed kan man ansätta sannolikheten till mycket låg för att någon kapsel ska skadas vid deponeringen. Men om detta skulle inträffa är konsekvenserna allvarliga. Strålskyddet runt hålets mynning kan arrangeras på lämpligt sätt så länge kapslarna är hela.

### 3.4 Försegling

Den översta delen av ett djupt hål måste förseglas för att hindra expansion uppåt. Erosion och borttransport av bentoniten, som har hög täthet i pluggzonen, måste också förhindras. Påverkan blir särskilt stor vid kommande nedisningar. Förseglingen kan enligt konceptutformningen /3-1/ ske genom betongingjutning till minst 50 meters djup över en lika mäktig asfaltfyllning. På markytan kan betongen täckas av stenfyllning. Utformningen och byggandet av ytliga förseglingar innebär inte stora svårigheter men ett antal frågor kräver bearbetning.

Följande insatser måste göras:

- Inverkan av den lokala topografin på det djup till vilket glacialerosion och djupvittring äger rum.
- Utredning av beständigheten och degraderingstakten hos betong och asfalt i det djupa hålet.

### 3.5 Återtag av kapsel

Gripverktyg som används för att ta upp föremål som har tappats i djupa borrhål vid prospekteringsborrning finns redan tillgängliga. Dessa anses kunna anpassas till konceptet djupa borrhål för kapselupptagning /3-2/.

Erforderliga insatser är:

- Design och byggande av prototyp av gripverktyg för anslutning till borrhåll.
- Provning av utrustningen i kort borrhål i Äspö samt i ett deponeringshål till fyra kilometers djup.

Ifall svårigheter finns att komma ner vid deponeringen måste åtgärder vidtas eller hålet förseglas och överges.

## Referenser

- /3-1/ SKB Projekt AlternativStudier för Slutförvar (PASS), Svensk Kärnbränslehantering AB, 1992.
- /3-2/ Harrison T Very deep borehole concept – Deutag's opinion on boring, canister emplacement and retrievability, SKB Report R-00-x (in prep), Svensk Kärnbränslehantering AB, 2000.

## 4 Tekniska barriärer

Detta kapitel beskriver kunskapsläget för de tekniska barriärerna till vilka även det använda bränslet hör. Beskrivningen fokuserar på de processer och de egenskaper som har betydelse för att en analys av förvarets långsiktiga radiologiska säkerhet ska kunna genomföras.

De tekniska barriärerna i konceptet djupa borrhål består av en kapsel fylld med bränsle omgiven av en buffert. Principiellt skiljer sig de tekniska barriärerna i ett djupt borrhål inte från dem i ett KBS-3-förvar. På vissa punkter fungerar dock barriärerna helt annorlunda. Följande avsnitt diskuterar de processer där de olika förvaringsmetoderna skiljer sig åt. Textstrukturen baserar sig i huvudsak på Processrapporten /4-1/.

### 4.1 Bränslet

För att kunna beskriva de processer som påverkar bränsleupplösningen under de förhållanden som råder i ett djupt borrhål behövs kunskap om kinetiken för oxidation och upplösning av bränslematrisen (huvudsakligen urandioxid). För att uppskatta de totala radionuklidutsläppen från förvaret behövs kunskapen om vilken form radionukliderna antar under rådande hydrokemiska förhållanden (speciering) samt om de sekundära fasta faser som dessa species kan bilda.

Av de faktorer som används för att beskriva bränslet i samband med en säkerhetsanalys är många desamma som för KBS-3-konceptet eller förväntas inte ge upphov till ett signifikant annorlunda resultat. Det rör sig om faktorer som strålningsintensitet, temperatur, vattenflöde, tryck, mekanisk belastning och radionuklidinnehåll. Skillnaden ligger snarare i att salthalten och temperaturen är påtagligt högre i ett djupt borrhål än i ett KBS-3-förvar.

#### 4.1.1 Strårelaterade processer

Processen är av fundamental betydelse, framför allt eftersom den beskriver hur farligheten och sammansättningen hos bränslet förändras med tiden. Energin som frigörs omvandlas till största delen till värme. Processen utgör därför även grunden till beskrivningen av förvarets termiska utveckling. Den värmepuls som resteffekten i bränslet genererar kommer att vara signifikant under de första hundratals åren. Avsvalningen tar tusentals år. Eftersom temperaturen i omgivningen kring kapslarna i djupa hål är högre än i ett KBS-3-förvar, når maximitemperaturen 120–150° C. Strålningsfältet utanför kapseln kommer också att vara kraftigare än utanför en KBS-3-kapsel, eftersom kapselväggen är tunnare. Därmed kan man räkna med att reducerande mineral i buffert och närliggande berg oxideras även då kapseln är hel, vilket inte är fallet i ett KBS-3-förvar. Oxidationen förorsakas av oxidanter som bildas vid radiolytisk sönderdelning av vatten. Ju kraftigare strålningsfält, desto mer radiolys får man.

#### **Termiska processer**

Temperaturen inuti kapseln beror av materialens värmeledningsförmåga. Värmeöverföringen kan beräknas på samma sätt som i ett KBS-3-förvar så snart de olika komponenterna i systemet har definierats.



### **Hydrauliska processer**

Om kapseln inte är tät kan vatten komma in i den. Hur mycket vatten som kommer in och hur fort detta går bestäms av såväl vattnets temperatur och tryck som av defektens geometri och kapselns utformning. En uppskattning av hydrauliska processer blir möjligt efter val av material och dimensioner för kapsel och buffert. Eftersom temperatur och tryck är högre jämfört med KBS-3 måste dessa faktorer beaktas vid bedömning av vilka material och dimensioner kapseln och bufferten bör ha.

### **Mekaniska processer**

Högre temperatur leder till att gastrycket ökar inuti kapslingsrören, vilket kan orsaka brott på dessa. Eftersom temperaturen är högre i ett djupt borrhål än i ett KBS-3-förvar kan vi förvänta oss att andelen skadade kapslingsrör ökar.

### **Kemiska processer**

I en defekt kapsel kommer effekten av radiolys att leda till oxiderande reaktioner som skiljer sig från motsvarande reaktioner i en KBS-3-kapsel. Anledningen till detta är att den förväntade höga kloridhalten i grundvattnet påverkar reaktionerna. Effekterna av detta är inte kända eftersom SKB hittills inte studerat bränsleupplösning vid hög jonstyrka. Däremot har undersökningar, i bland annat Tyskland, gjorts som behandlar detta /4-2/. De tyska studierna gjordes vid salthalter som förmodligen till och med överstiger de som vi kan förvänta oss i ett djupt borrhål.

#### **4.1.2 FoU-program för bränsle**

Målet för bränsleprogrammet är att utveckla en modell för upplösning under rådande förhållanden så att denna kan användas till att definiera källtermen i en nuklidtransportberäkning. De samlade erfarenheterna i nuvarande bränsleprogram kan användas för att förstå de processer som bestämmer frigörelsen av radionuklider. Som tidigare nämnts är de flesta faktorer som påverkar processerna desamma som för ett KBS-3-förvar. Det som skiljer är grundvattnets kemi (hög jonstyrka och t ex högre pH om betongfyllda kapslar används, eller mycket lägre halt av löst vätgas om inte en stålkapsel används) liksom även högre temperatur. Hur de kemiska förhållandena kommer att utvecklas är beror bl a på vilka kapslings- och buffertmaterial som används och hur dessa påverkar vattenkemin.

En litteratursammanställning över bränslelagningsförsök, som gjorts vid höga jonstyrkor och högre temperaturer inom ramen för andra länders avfallsprogram, vore därför den första forskningsinsatsen på området. Med denna som bas formuleras sedan ett specifikt forskningsprogram. Vi kan dock redan nu identifiera ett antal nödvändiga insatser.

#### **Analytiska metoder**

Alla modeller för bränsleupplösning är baserade på mätdata från olika experiment som genomförts under så realistiska förhållanden som möjligt. Kvaliteten på dessa mätdata avgör kvaliteten på de modeller som utarbetas. Därför är det viktigt att ha en god kvalitet på de kemiska analyser som utförs. I SKB:s nuvarande program för bränsleupplösning används analysinstrument som ger en hög upplösning mellan de intressanta elementen. Detektionsgränsen är låg och det är möjligt att analysera många ämnen samtidigt. Dessa instrument kan inte utan vidare användas för den typ av prov som är relevanta för djupa borrhål, på grund av den höga

salthalten. Därför krävs en utveckling av separationsmetoder som möjliggör att de intressanta ämnena kan separeras från en laktösning innan de analyseras.

### ***Radiolys vid hög kloridhalt – hög jonstyrka***

Produktionen av oxidanter vid radiolys i vatten med hög kloridhalt är större än vid låga kloridhalter. Vilka konsekvenser detta, i förening med högre temperatur, kan få på kinetiken för de processer som påverkar bränsleupplösningen måste utredas.

### ***Radionuklidspeciering***

Modeller för beräkning av bränsleupplösning baseras på termodynamiska databaser. Dessa innehåller information om de olika kemiska former (specier) som radionukliderna bildar i den rådande kemiska miljön, samt om kinetiken för olika processer som påverkar bränsleupplösning. Av speciellt stor betydelse är de som berör redoxreaktioner och deras kinetik. För djupa borrhål krävs en insats för att ta fram motsvarande basdata som kan användas vid beräkningar vid hög jonstyrka och hög temperatur.

Flervärda (III) och (IV) lantanider och aktinider påverkas starkt av förändringar i jonstyrkan. Effekten blir att stabiliteten i deras ligandkomplex påverkas. Beroende på vattnets sammansättning kommer lösligheten och upplösningshastigheten att förändras. Kunskapen om detta är nödvändig för att förstå bränsleupplösningshastigheten samt även radionuklidmigration under dessa förhållanden.

Ett område med stort behov av ökad forskning gäller lösligheten hos aktinider med svårlösliga reducerande specier så som Pu(IV). Också bildningen av sekundära fasta faser vid hög jonstyrka, eventuellt också vid högt pH och hög temperatur, måste undersökas.

I dessa studier måste man ta hänsyn till de effekter som barriärsystemet kan ha på vattenkemin. Förändringar i de väsentliga tillståndsvariablerna pH och Eh påverkar i hög grad samtliga reaktioner som bestämmer upplösningsskinetik, speciering och löslighet. Om en betongfylld titankapsel väljs måste man, förutom att räkna med högt pH, även beakta att zirkaloy-legeringen i bränslestavarna kan korrodera mycket snabbare än vid neutrala pH-värden. Experimentella studier skulle krävas.

### ***Bränslekolloider***

Upplösningen av bränslematrisen kan leda till att det bildas kolloider med andra kemiska egenskaper än de lösta ämnena. I konceptet djupa borrhål måste man ta särskild hänsyn till detta eftersom den filtreringsmekanism som man kan räkna med i bufferten i KBS-3-konceptet kanske inte finns i djupa borrhål.

## **4.2 Kapseln**

Det använda bränsle som genereras av det svenska kärnkraftprogrammet ska kunna tas om hand för deponering i ett djupförvar på ett sådant sätt att säkerheten kan garanteras under inkapsling, transport, deponering och slutförvaring. Den styrande förutsättning är säkerheten under slutförvaringen.

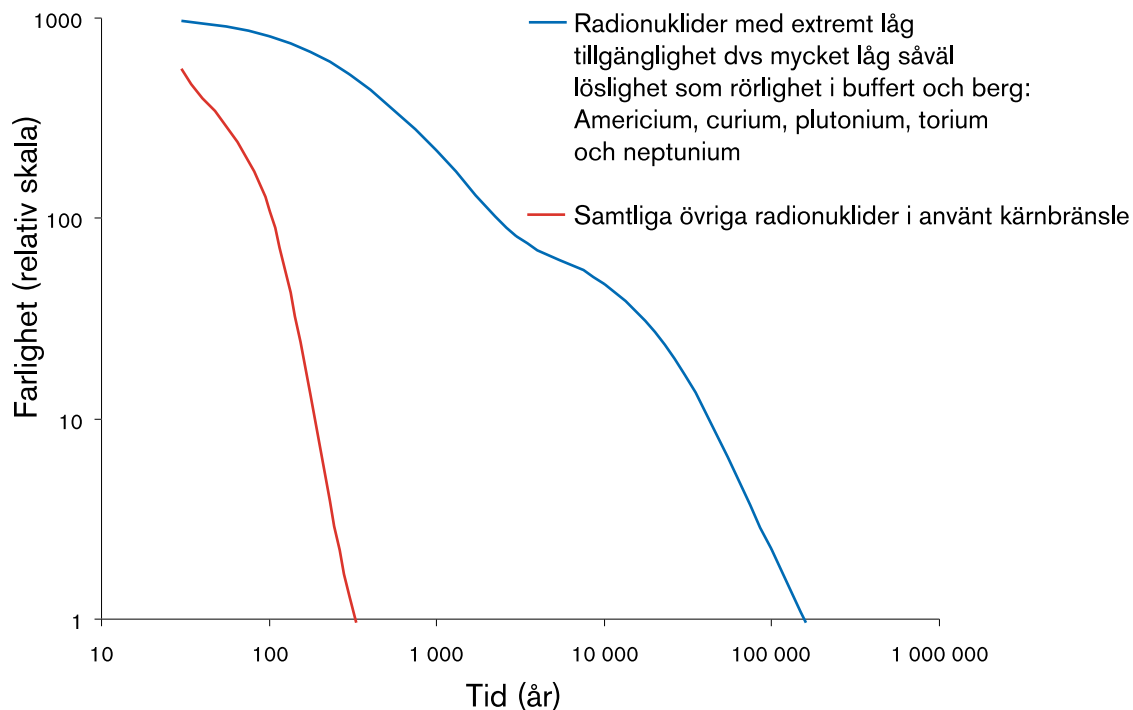
Kapseln längd bestäms av bränsleelementens längd. Diametern bestäms av storleken på de djupa hål där kapseln ska deponeras. En antagen borrhålsdiameter på 80 centimeter ger en kapseldiametern på 50 centimeter för att utrymmet för applicering av buffertmassa och säker deponering ska bli tillräckligt stort /4-3/.

#### 4.2.1 Säkerheten i djupförvaret

Den relativa farligheten hos bränslet som funktion av tiden illustreras i figur 4-1. Kurvan gäller för intag med föda, men förloppet med tiden är i stort sett detsamma även för inandning. Farligheten 1 motsvarar farligheten hos de åtta ton naturligt uran med dottrar, som ett ton bränsle framställts av. Som framgår av figuren, avtar farligheten för de lättare tillgängliga radionukliderna till låga nivåer genom att de faller sönder under de första trehundra åren. Det största bidraget till bränslets farlighet kommer från aktiniderna. Under de första tusen åren dominerar curium och americium. Därefter står plutoniums isotoper för det största bidraget fram till cirka 100 000 år då minskningen i aktivitet av <sup>239</sup>-Pu börjar bli märkbar.

Restvärmet i bränslet alstras huvudsakligen av fissionsprodukter under de första hundratalens åren. En isolering av bränslet i 1 000 år motsvarar från radiotoxisk synpunkt en reduktion med ungefär en faktor tio, men medför också att en överväldigande del av de mer lättillgängliga radionukliderna klingat av. En ytterligare tiofaldig reduktion erhålls först efter ytterligare 50 000 år.

Kapselns funktion i det djupa borrhålet är att isolera det använda bränslet från omgivningen. Kravet är formulerat så att kapseln helt ska isolera avfallet. Inga kända korrosionsprocesser ska bedömas kunna leda till att kapselns integritet bryts under de första 1 000 åren efter deponering. Detta krav på täta kapslar leder till krav på:



Figur 4-1. Relativ farlighet för använt kärnbränsle som funktion av tiden.

- initial täthet
- kemisk beständighet i den miljö som förväntas i det djupa borrhålet
- mekanisk hållfasthet under de betingelser som förväntas råda i det djupa borrhålet

#### **4.2.2 Säkerheten vid drift**

Inga hanteringsmissöden, som kan förutses, ska leda till att personalen vid förvaret utsätts för oacceptabla stråldoser eller till att anläggningen släpper ut radioaktiva ämnen.

Hanteringen av kapseln ska kunna genomföras så att påfrestningar och belastningar från förutsedda missöden antingen kan tas upp av kapseln själv eller, där detta inte är möjligt, av lämpligt utformade mekaniska skydd.

Kraven på säkerhet vid drift och underhåll av inkapslingsanläggningen är höga. Kapselns konstruktion ska motsvara de krav som kan ställas med hänsyn till normala och exceptionella driftfall i inkapslingsanläggningen. Detta innebär att kapseln ska kunna:

- tillverkas i serieproduktion med upprätthållande av specificerade kvalitetskrav.
- hanteras så att inga missöden, som kan förutses, leder till att personalen utsätts för oacceptabla stråldoser eller till utsläpp av radioaktiva ämnen från anläggningen.
- transporteras till djupförvaret och deponeras på ett säkert sätt.
- återtogs från djupförvaret på ett säkert sätt om så erfordras.

#### **4.2.3 Konstruktionsförutsättningar**

Kapslarna ska tillverkas, förslutas och kontrolleras med metoder som garanterar att högst 0,1 procent av de färdiga kapslarna innehåller fel, som är större än vad acceptanskriterierna för den oförstörande provningen tillåter. Detta är en nivå som kan uppnås med tillgängliga metoder för provning. Förutom att kapslarna ska vara täta efter förslutning krävs även att inga kända korrosionsprocesser ska kunna leda till att kapselns livslängd blir kortare än 1 000 år i det djupa borrhålet.

#### ***Kriticitet***

Kapseln måste utformas så att bränslet förblir underkritiskt även om vatten skulle tränga in i kapseln. Detta påverkar utformningen av kapselns inre. Antingen måste kapseln utformas så att den mängd moderator (vatten) som kan rymmas i kapseln begränsas eller också använder vi oss av lämpliga neutronabsorbatorer.

#### ***Mekanisk hållfasthet***

Den mekaniska hållfastheten hos en kapsel för använt kärnbränsle beror till stor del på utformningen. Kapseln kan utformas så att höljet förmår bära det yttre trycket. Alternativt kan den utformas så att den mekaniska hållfastheten fås genom att ytterhöljet stöds av en lämpligt utformad inre struktur. Av tillverkningstekniska skäl och hållfasthetsskäl förutsätts kapseln vara utformad som en cylinder med plant lock och plan botten.

Kapseln ska klara en last motsvarande det tryck buffertmaterialet utövar på fyra kilometers djup. Det litostatiska trycket anses inte vara dimensionerande, eftersom kapselns livslängd har begränsats till 1 000 år, och inga kryprörelser i berget anses få betydelse under denna tidsperiod.

Valet av säkerhetsfaktor görs utifrån gängse praxis för stålbyggnadskonstruktioner och tryckkärl. Eftersom kapseln inte kan betraktas som ett konventionellt tryckkärl i så måtto att den utsätts för yttre övertryck i stället för inre övertryck, har i första hand riktlinjerna för stålbyggnad beaktats. För kapseln har säkerhetsfaktorn satts till minst 2,5, vilket ska jämföras med den minsta tillåtna säkerhetsfaktorn på 2. Säkerhetsfaktorn ska täcka osäkerheter i materialegenskaper, tillverkning och även osäkerheter i belastningen i djupförvaret.

Underlaget är otillräckligt för att kunna rangordna tänkbara kapselmaterial. Frågan diskuteras vidare i avsnitt 4.2.4.

### **Korrosionsbeständighet**

Grundvattensammansättningen på 4 000 meters djup är inte fullständigt känd. De data som finns tyder på att kloridhalten kan vara hög med värden på tio procent eller mycket mer. Redoxpotentialen förväntas ligga mellan -200 och -300 mV på väteskalan och vattnets surhetsgrad sträcker sig från neutralt till mildt alkaliskt (pH 7–9), men värden utanför detta intervall kan för närvarande inte uteslutas.

Beständighet mot korrosion kan uppnås på flera sätt. Kapseln kan tillverkas i ett material som inte angrips av korrosion under de förutsedda förhållandena, det vill säga, materialet är immunt mot korrosion. Alternativt kan beständighet uppnås genom att kapselmaterialet skyddas genom att det bildas ett svår genomträngligt ytskikt av korrosionsprodukter. Materialet är då passivt under de förhållanden som råder i det djupa borrhålet. Ett tredje alternativ är att tillverka kapseln i ett material som korroderar på ett förutsägbart sätt och ger den en korrosionsmån som garanterar önskad livslängd.

Material som är immuna är ädelmetallerna och många keramer. Till de passiva metallerna hör titan, titanlegeringar, rostfria stål med flera. Kapslar med korrosionsmån skulle kunna tillverkas i låglegerade kolstål.

### **Hantering**

Kapseln ska kunna transporteras i därför avsedd transportbehållare, som uppfyller gängse krav på strålskärning, brandsäkerhet och mekaniskt skydd.

Kapseln ska vara så utformad att återtag från förvaret är möjligt utan att anordningar på kapseln för detta ändamål äventyrar kapselns integritet i ett långtidsperspektiv i förvaret. En återtagen kapsel ska efter eventuell mellanlagring kunna deponeras igen.

#### **4.2.4 Forsknings- och utvecklingsprogram för kapselutformning**

Tillvägagångssättet för val av kapselmateriale och -utformning kan vara att:

- först välja från korrosionssynpunkt lämpliga kapselmateriale
- därefter göra en sällning baserat på mekaniska egenskaper (hållfasthet)
- slutligen föreslå en eller flera kapselutformningar med hänsyn tagen till mekaniska och hanteringsmässiga krav.

### **Korrosion**

Även om korrosion i salta vatten vid hög temperatur har studerats både i samband med kärnavfallshantering och i andra sammanhang har SKB inte tidigare ägnat sig åt detta i någon större omfattning. En första etapp i ett forskningsprogram skulle därför vara att sammanställa tillgängliga litteraturdata. Efter en preliminär utvärdering bör ett antal kandidatmaterial kunna väljas för eventuella egna kompletterande studier. För att få lämplig bredd på programmet kan det vara lämpligt att välja ett förstahandsalternativ från vardera av materialgrupperna passiva material, korroderande material och – om ett sådant alternativ kan identifieras – immuna material. Degraderingsförloppet hos kapslarna bör modelleras för att vi ska få en uppfattning om hur stora mängder korrosionsprodukter som bildas. Kapselmaterialets påverkan på bufferten och vice versa bör också utredas.

### **Hållfasthet**

Den kortare livslängden på 1 000 år för kapseln för djupa borrhål gör att korrosionen inte blir styrande för valet av kapselmaterial. Det kan visa sig att konstruktionsmålet kan nås med flera alternativa material och att i så fall materialets mekaniska egenskaper kommer att vara styrande.

### **Kapselutformning**

För kapselutformningen finns i praktiken två huvudalternativ. Antingen görs kapseln självbärande, vilket kommer att kräva en väggtjocklek på flera tiotals millimeter, eller förses med en inre tryckbärande struktur. Båda alternativen bör utredas och kostnader för material, tillverkningsteknik och krav på hantering och deponering av kapseln måste utredas i den här fasen.

## **4.2.5 Utvecklingsprogram för kapseltillverkning**

Arbetet med kapseltillverkning kan delas in i fyra steg:

- Val av kapslingsmaterial och kapseldesign enligt 4.2.4.
- Detaljkonstruktionsritningar och tillhörande tekniska specifikationer med bl a krav på material tas fram. Kontakter med tillverkare tas tidigt för att involvera dem i arbetet och nyttja deras kompetens. Kostnadsbedömning för framställning av kapsel görs. Detta steg omfattar ungefär två års arbete.
- Tillverkningsprov av alla kapselkomponenter utförs i full skala. Syftet med detta är att finna och utveckla den bästa tillverkningstekniken och att skapa långsiktiga kontakter med de bästa leverantörerna av ämnesmaterial och teknik. Komponenterna består av hölje, insats, lock och botten. Vi undersöker i detta skede möjligheten att göra konstruktionsförbättringar, optimera tillverkningen samt eventuell nytillverkning. Vi måste också utveckla metoder för oförstörande provning. Steget omfattar cirka fem års arbete.

- Ett antal kompletta kapslar bör sättas samman för olika deponeringstester och återtagsförsök. Denna provserie har till syfte att visa att vi klarar av att tillverka och försluta kapslar samt att vi klarar av producera ett visst antal kapslar per år i serie med upprätthållande av specificerade kvalitetskrav enligt ett kvalitets-system för tillverkning och oförstörande provning. Materialet måste väljas så att kapaciteten hos underleverantörerna kan garantera att material och kapselämnen alltid finns tillgängliga i nödvändiga kvantiteter. Steget omfattar cirka tre års arbete.

#### 4.2.6 Serieproduktion

En kostnadsberäkning bör göras för att påvisa om vi ska bygga en speciell kapselfabrik för tillverkning av tomma kapslar, vilka sedan transporteras till inkapslingsanläggningen. Man kan göra antagandet att ämnesmaterial i form av plåt till hölje och smidda lock och botten levereras till fabriken från externa leverantörer. Vi måste även ta ställning till vilken typ av insats som ska användas eller om vi överhuvudtaget ska använda någon insats.

Rent ekonomiskt kan alternativet annars vara att låta flera leverantörer tillverka och montera kapslar. Färdiga kapslar levereras därefter direkt till inkapslingsanläggningen.

### 4.3 Buffert

Det primära i programmet för val av buffertmaterial är att definiera funktionskraven för bufferten. Säkerheten i konceptet garanteras uteslutande av geosfärens egenskaper, vilket gör att kraven på bufferten inte är lika omfattande som i ett KBS-3-förvar. Frågeställningen blir därför: Är buffertens funktion bara att hålla kapslarna på plats efter deponeringen, eller ska den också ha någon typ av isolerande funktion?

I vårt tidigare förslag till koncept /4-3/ används en buffert av deponingslurry/bentonitblock. Avfallskapslarna har en diameter av 50 centimeter. Dessa kopplas till en meter höga cylindrar av högkompakterad bentonit, vilka också har en diameter av 50 centimeter. Blocken har en densitet av 2 100 kg/m<sup>3</sup>. Dessa paket omges av en porös bur. Paketen är konstruerade för att kunna pressas genom fyra kilometer borrhälska och tio meter deponeringslurry. En blandning av 30 procent och 70 procent kvarts i en tioprocentig koksaltlösning fungerar som deponeringslurry.

Det är långt ifrån självklart att detta alternativ är det mest lämpliga. De höga jonstyrkan i grundvattnet gör att det knappast blir något svälltryck överhuvudtaget i bentoniten som inte har hög smektithalt och samtidigt mycket hög densitet. Ett sådant material kan vara svårt att åstadkomma på så stora djup. Funktionskraven på bufferten gör att andra material kan vara lämpligare än lera. Ett exempel skulle kunna vara betong.

När ett, eller flera, lämpliga kandidatmaterial har valts ska funktionen i förvaret utvärderas. Det är idag oklart vad detta innebär, eftersom inga funktionskrav har fastställts och inget material har valts. Här följer dock en kort presentation av de områden som bör studeras.

### 4.3.1 Strålrelaterade processer

Dosraten utanför kapseln skiljer sig från KBS-3-alternativet, på grund av den tunnare kapselväggen. Radiologisk oxidation behöver utredas

### 4.3.2 Termiska processer

Buffertens termiska ledningsförmåga styr temperaturen inuti kapseln och på kapselytan. Värmeflödet och temperaturen kan beräknas på samma sätt som för KBS-3-konceptet. Temperaturen vid kapselytan blir betydligt högre än i KBS-3 och har beräknats till 120–150°C /4-3/ beroende på hur mycket bränsle som fylls i varje kapsel.

### 4.3.3 Hydrauliska processer

Buffertens hydrauliska egenskaper styr transporten av vatten och lösta ämnen till och från kapseln. Dessa är beroende av vilket buffertmaterial som har valts, men också av deponeringstekniken och tidsberoende materialförändringar.

Om kapseln tillverkas av ett material som ger vätgas vid korrosion måste också buffertens gastransportegenskaper studeras.

För det buffertalternativ som tidigare studerats var deponeringsslurryn kring kapslarna initialt vattenmättad. De högkompakterade bentonitblocken mellan kapslarna kommer då att ta upp vatten från deponeringsslurryn. Blocken sväller och kompakterar slurryn. Efter fullständig konsolidering kommer både block och slurry att ha en densitet på omkring 1 900 kg/m<sup>3</sup>. Den hydrauliska konduktiviteten hos bufferten bestäms av smektithalt, densitet, temperatur och porvattnets jonstyrka. Vid de förhållanden som råder i ett djupt borrhål kan då buffertens konduktivitet förväntas vara 10<sup>-9</sup> m/s, dvs avsevärt högre än i KBS-3. Det är inte självklart att diffusion kommer att vara den dominerade transportmekanismen. Bentonitblocken mellan kapslarna kommer att ha en konduktivitet på 10<sup>-11</sup> m/s. Insatser krävs för att välja och testa olika buffertmaterial och utröna vilka hydrologiska egenskaper de har.

### 4.3.4 Mekaniska processer

Ett uppenbart krav på bufferten är fixera kapslarna på plats i hålet. Ett önskemål är att skydda kapseln från mekanisk påverkan från berget. Den mekaniska interaktionen mellan kapsel/buffert och buffert/berg är därför viktiga att studera.

Om bentonit/deponeringsslurry används kommer bentonitblocken att ta upp vatten från deponeringsslurry och svälla. Ett jämviktstillstånd mellan slurry och bentonit kommer att ställa in sig när konsolideringstrycket hos slurryn når samma värde som hos de svällande bentonitcylindrarna. Detta tryck har tidigare beräknats till 500–800 kPa /4-3/.

Ett av de stora problemen i konceptet djupa borrhål är den mekaniska växelverkan mellan kapslar och buffert under och direkt efter deponeringen. Denna växelverkan kommer att ha stor betydelse för vilket buffertmaterial som väljs och vilka forskningsinsatser som krävs.



Det är mycket troligt att det kommer att rasa bergblock från väggarna i borrhålen. Detta kommer att påverka bufferten egenskaper. För alternativet med bentonit/slurry kan det betyda att bufferten får lägre densitet av vad som är avsett. Detta beaktas vid valet av buffertmaterial, jämför 4.3.3.

#### 4.3.5 Kemiska processer

De kemiska processerna styr buffertmaterialets långtidstabilitet. De bestämmer också hur bufferten påverkar kapseln. På två till fyra kilometers djup kommer grundvattnet att ha en mycket hög jonstyrka och temperaturen i förvaret kommer att vara över 100°C. Detta kommer att påverka buffertens stabilitet, oberoende av vilket material som väljs.

Buffertens transportegenskaper beror på vilket material som väljs och hur detta material utvecklas med tiden. Lösta ämnen kan transporteras genom bufferten antingen genom advektion eller diffusion.

Om en lerbaserad buffert används är de kemiska processerna i bufferten desamma som i ett förvar av KBS-3-typ. Den stora skillnaden i randvillkor (temperatur och jonstyrka) gör dock att effekten av processerna kan bli en helt annan. De processer som ska diskuteras är:

- Jonbyte/sorption. Den höga jonstyrkan i grundvattnet tillsammans med den relativt låga montmorillonithalten gör att jonbyte Na/Ca kan gå relativt fort. Detta medför att svälltrycket hos bufferten sjunker.
- Montmorillonitombildning. Den höga temperaturen i förvaret gör att omvandlingsprocessen montmorillonit/illit går fortare än i KBS-3. Den relativt korta perioden med höga temperaturer gör dock att detta fenomen troligtvis har begränsad betydelse.
- Upplösning/utfällning av föreningar. Höga temperaturer tillsammans med höga jonstyrkor medför att ackumulering av salter på eller i närheten av kapselytan kan bli ett problem.
- Kolloidfrigörelse/erosion. Låga flöden och höga jonstyrkor kommer troligtvis att eliminera risken för erosion av bufferten.
- Mikrobiologiska processer. Buffertens densitet är för låg för att bakteriell aktivitet helt ska kunna uteslutas.

#### 4.3.6 Tidsplan

Den tid som det kommer att ta för att öka kunskapen om buffertmaterialet i konceptet djupa hål till samma nivå som för KBS-3-metoden är starkt beroende på vilka krav som ställs och vilket material som väljs.

Kravspecifikation och första materialval kommer att ta mellan två och tre år. Om kraven på bufferten är lika höga som i KBS-3-alternativet kommer det troligen att ta 20 år innan kunskapsnivån är lika hög. De är dock möjligt att mycket små krav ställs på bufferten och då skulle programmet kunna genomföras på ungefär fem år.

Programmet är starkt kopplat till de studier som görs av deponeringstekniken. Buffertens egenskaper påverkar också programmen för bränsle och kapsel.

## 4.4 Radionuklidtransport

Radionuklidtransporten kan beräknas med samma modeller som används för KBS-3-förvar. Processerna är desamma, men data och randvillkor skiljer, se kapitel 5.

### Referenser

- /4-1/ SKB SR 97 – Processer i förvarets utveckling, Svensk Kärnbränslehantering AB, 1999.
- /4-2/ Grambow B, Loida A, Dressler P, Geckeis H, Gago J, Casas I, De Pablo J, Gimenez J & Torrero M Long-term safety of radioactive waste disposal: Chemical reaction of fabricated and high burnup spent  $UO_2$  fuel with saline brines, Wissenschaftliche Berichte, FZKA 5702, Karlsruhe, March 1996.
- /4-3/ SKB Projekt AlternativStudier för Slutförvar (PASS), Svensk Kärnbränslehantering AB, 1992.

## 5 Säkerhetsanalys

Detta kapitel beskriver kortfattat metodiken för analys av den långsiktiga säkerheten för alternativet djupa borrhål. Metodiken bygger i stora delar på den som användes för säkerhetsanalysen SR 97 /5-1/ som gällde KBS-3-metoden. De båda förvarsalternativen är snarlika i så måtto att de bygger på flerbarriärssystem i geologisk miljö och därför kan också liknande metoder användas för säkerhetsanalysen. Däremot skiljer sig det nödvändiga kunskapsunderlaget åt på många punkter.

### 5.1 Säkerhetsprinciper

Alternativet djupa borrhål bygger liksom KBS-3-metoden på säkerhetsprinciperna isolering och fördröjning. Isoleringen åstadkoms av en metallkapsel. Med tiden förväntas kapseln korrodera och därefter fördröjer buffertmaterialet och geosfären de radionuklider som frigörs från bränslet. Även den långsamma upplösningen av bränslet bidrar till fördröjningen.

Jämfört med KBS-3-metoden förlitar sig alternativet djupa borrhål mer på fördröjningsfunktionen eftersom kapselmaterialet inte kan förväntas isolera det använda kärnbränslet på långt när lika länge som KBS-3-metodens kopparkapslar. Å andra sidan kan fördröjningen i geosfären förväntas vara betydligt effektivare på två till fyra kilometers djup än på de 500 meter som är riktvärdet för KBS-3-metoden.

### 5.2 Metodik

Alternativet djupa borrhål bör kunna analyseras med avseende på den långsiktiga säkerheten med samma metodik som används för analysen av KBS-3-systemet, eftersom båda metoderna bygger på liknande barriärssystem och är tänkta att användas i liknande geologiska miljöer. Tillämpning av liknande metoder ger flera fördelar. Dels finns sådan metodik redan utvecklad och nyligen tillämpad i säkerhetsanalysen SR 97 /5-1/, dels underlättas en eventuell jämförelse mellan de båda alternativen.

SR 97 kan i korthet sägas bestå av att:

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

Utmärkande för en säkerhetsanalys är också att underlaget alltid kommer att vara behäftat med brister eller osäkerheter av olika slag. En viktig del av metodiken består därför i att hantera dessa osäkerheter på ett sådant sätt att argumentationen för den redovisade säkerheten blir trovärdig.

Mer i detalj kan metodiken i SR 97 beskrivas i fem steg:

### **1. Systembeskrivning**

En systematisk analys kräver en strukturerad beskrivning av alla inre processer, sambanden dem emellan och de egenskaper hos förvaret som respektive process påverkar. Att upprätta en sådan systembeskrivning är därför en första uppgift i en säkerhetsanalys.

### **2. Beskrivning av initialt tillstånd**

Därefter beskrivs förvarets utseende då det just förslutits eller dess initiala tillstånd. Här beskrivs dimensioner och material för de konstruerade delarna av förvaret (bränsle, kapsel, buffert/återfyllning) och struktur och egenskaper för geosfären kring förvaret så som dessa initialt ser ut.

### **3. Val av scenarier**

En rad scenarier för vilka förvarets utveckling ska analyseras väljs ut. De valda scenarierna bör tillsammans ge en rimlig täckning av de olika utvecklingsvägar förvaret och dess omgivning kan tänkas ta.

### **4. Analys av valda scenarier**

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

### **5. Utvärdering**

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

Metodiken talar om hur en säkerhetsanalys genomförs och ger därför också vägledning om vilket underlag som behöver byggas upp i ett långsiktigt program för säkerhetsanalyser. Väsentliga delar av underlaget till en säkerhetsanalys utgörs av resultat från forskning. Därmed kan metodiken för säkerhetsanalysen också användas för att ställa krav på forskningsprogrammet.

## **5.3 Program för säkerhetsanalys**

En säkerhetsanalys genomförs vanligen vid ett valt tillfälle i form av ett tidsbegränsat projekt. Analysen bygger på ett visst kunskapsunderlag och en mer eller mindre väl specificerad systemutformning. Dessa båda underlag växer fram långsiktigt och kontinuerligt och har diskuterats i tidigare kapitel.

Vissa ytterligare arbeten som är direkt relaterade till säkerhetsanalysens metodik genomförs också på lång sikt och antas finnas tillgängliga då ett säkerhetsanalysprojekt startar. Dessa arbeten utgör innehållet i ett långsiktigt program för säkerhetsanalys. Det huvudsakliga innehållet i ett sådant program är:

- Att upprätta en databas där alla egenskaper, händelser och processer av betydelse för bedömningen av förvarets säkerhet samlas. En sådan benämns vanligen FEP-databas efter engelskans features, events, processes.

- Att upprätta en systembeskrivning anpassad efter säkerhetsanalysens behov, första punkten i avsnitt 5.2 ovan. I säkerhetsanalysen SR 97 gjordes systembeskrivningen i form av sk THMC-diagram med en vidhängande Processrapport /5-2/ som sammanfattar kunskapen om de processer som styr förvarets utveckling på sikt.
- Att utveckla modeller för grundvattenflöde i lokal skala samt modeller för radionuklidtransport i närområde och geosfär.

Till programmet för säkerhetsanalys hör också en allmän utveckling av säkerhetsanalysens metodik, men detta tas inte upp här eftersom befintlig metodik för KBS-3-metoden antas kunna tillämpas för alternativet djupa borrhål.

## 5.4 Genomförande

Hur säkerhetsanalysen för djupa borrhål genomförs kan inte planeras i detalj i förväg. Vissa moment kan dock förutses. Bland annat blir scenarierna vid en säkerhetsanalys av konceptet djupa borrhål annorlunda jämfört med en säkerhetsanalys av ett KBS-3-förvar. Redan idag kan vi se att exempelvis följande frågeställningar måste belysas:

- saltsprångets betydelse som barriär
- de flacka sprickzonernas betydelse för radionuklidtransporten
- inverkan av storskaliga hydrauliska förbindelser
- hydro-mekanisk påverkan vid borrning
- bufferten kryper ut i berget
- allt bränsle samlas på hålets botten

Funktionen hos de kopplade komponenterna deponeringsslurry, bentonitblock och kapslar bestämmer förmågan att hindra vattenomsättning och transport av radionuklider. Närområdets funktion bestäms av såväl temperatureffekter, hydrauliskt och mekaniskt beteende som av olika kemiska processer (THMC).

Beräkningen av uttransporten av radionuklider, som kan frigöras från kapslarna, förutsätter att följande insatser görs:

- modellering av degraderingsförlopp genom tektonik och kemisk påverkan (hål, kapslar, lerisoleringar)
- funktionsmodellering av det kompletta systemet med utveckling och tillämpning av kopplade THMC-modeller.

## Referenser

/5-1/ SKB SR 97 – Säkerheten efter förslutning, 1999.

/5-2/ SKB SR 97 – Processer i förvarets utveckling, 1999.

## 6 Tidsplaner och kostnader för FUD-programmet djupa borrhål

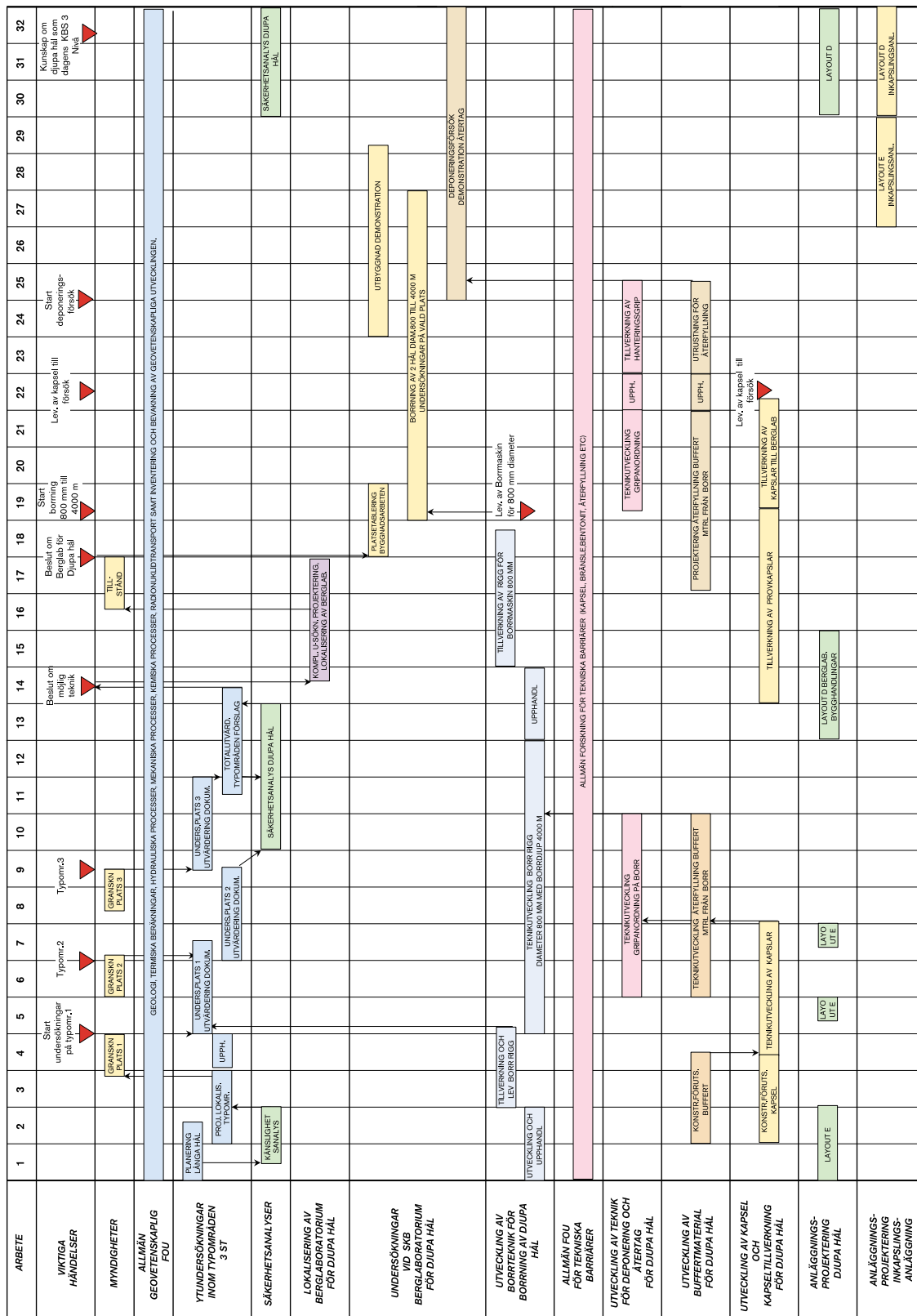
Utifrån de beskrivningar som finns i kapitel 2 till 5 har en tidsplan utarbetats för hela programmet för forskning, utveckling och demonstration. Från planen framgår att de geovetenskapliga insatserna styr tidsåtgången. Utveckling av borrhåsteknik kan innehålla stora osäkerheter och skulle kunna förlänga den totala tiden ytterligare.

Kostnaderna har uppskattats för de enskilda aktiviteterna som ingår i beskrivningen i kapitel 2 till 5. På samma sätt som med tidsplanerna måste kostnaderna anses utgöra det lägsta möjliga utfallet. Förutsättning är att aktiviteterna kan genomföras på den tid som tidsplanerna anger.

Den totala kostnaden och tiden för att utveckla deponeringskonceptet djupa borrhål till en kunskapsnivå som motsvarar den vi idag har för KBS-3-konceptet uppskattas till 3,5 miljarder kronor och 32 år. Med 20 procents pålägg för oförutsedda utgifter uppgår slutsumman till cirka 4,2 miljarder kronor.

Det mera ingående kostnadsuppskattningarna har delats upp i nedanstående huvuddelar:

* Allmän geovetenskaplig FoU	550 Mkr
* Undersökningar inom tre typområden	300 Mkr
* Säkerhetsanalyser	50 Mkr
* Lokalisering av ett berglaboratorium för djupa hål	60 Mkr
* Undersökningar vid SKB berglaboratorium för djupa hål i två 4 000 meter djupa deponeringshål	1 400 Mkr
* Utveckling av borrhåsteknik för borrhållning av djupa hål	130 Mkr
* Allmän FoU för tekniska barriärer	550 Mkr
* Utveckling av deponeringsteknik för djupa hål	100 Mkr
* Utveckling av buffertmaterial för djupa hål	140 Mkr
* Utveckling av kapsel och kapseltillverkning för djupa hål	100 Mkr
* Anläggningsprojektering för djupa hål	80 Mkr
* Anläggningsprojektering för inkapslingsanläggning	40 Mkr
<b>Ovanstående ger en uppskattad kostnad av</b>	<b>3 500 Mkr</b>
<b>Påslag 20 procent för oförutsett ger</b>	<b>4 200 Mkr</b>



Figur 6-1. Tidsplan för FUD-programmet djupa borrhål.

## 7 Slutsatser

Likheterna mellan koncepten djupa borrhål och KBS-3 gör det lättare att bedöma vilka insatser som måste göras för att utveckla konceptet djupa borrhål till samma kunskapsnivå som KBS-3. Analysen av den långsiktiga säkerheten och omfattningen av de geovetenskapliga forsknings- och utvecklingsinsatserna är snarlika. Däremot skiljer sig behoven när det gäller teknik och demonstration. Tabell 7-1 sammanfattar de viktigaste skillnaderna.

**Tabell 7-1. Viktiga skillnader mellan förvarskoncepten KBS-3 och djupa borrhål när det gäller utveckling av teknik och demonstration.**

Process / teknisk aktivitet	KBS-3	Djupa borrhål
Geologisk karakterisering, större diskontinuiteter	Känd och beprövad teknik, möjlighet att se berget i detaljundersökningsskedet.	Utvecklingsbehov att karakterisera berg på stort djup.
Geologisk karakterisering, sprickfördelning	Känd teknik, beprövade metoder för datainsamling, utveckling pågår inom många discipliner kring att representera fördelningar och egenskaper.	Undersökningar på stora djup måste ske i vertikala borrhål. Begränsade möjligheter att observera andra sprickor än de som skär hålen.  Kunskapsuppbyggnad erfordras som delunderlag till bedömning av förutsättningar/risk för strukturkontrollerade brott i borrhålsvägg samt som underlag till processförståelse för uppsprickningsgrad.
Hydraulisk och hydrokemisk karakterisering	Känd och beprövad teknik. Ökat problem med ökat djup p g a tätare berg.	Troligen endast möjligt inom diskontinuiteter.
Bergmekanisk karakterisering	Känd teknik inom anläggningsindustrin tillämpbar till 500–1 500 meter, dock ökande problem med mekanisk karakterisering samt spänningsmätning mot djupet.	Känd teknik inom oljeindustrin, dock inte utvecklad för kristallin berggrund.  Kunskapsuppbyggnad erfordras om påverkan av höga spänningar på större djup på provresultat.
Kapselkonstruktion	Etablerad konstruktion, utveckling av tillverkningsmetodik pågår	Konceptuell skiss finns. Val av kapselmateriäl, -utförning och tillverkningsmetodik.

*Fortsättning på nästa sida.*



Process / teknisk aktivitet	KBS-3	Djupa borrhål
Borring av deponeringshål	Beprövad teknik.	Borrhål till 4 000 meters djup med så stor diameter som 0,8 meter har aldrig utförts.  Kunskapsuppbyggnad erfordras om material i borrhålsutrustning för aktuell dimension, hanterings-system för utrustning (styrning etc) likväl som för design av borrhåls- och hantering av eventuella berg-utfall, samt installation av borrhåls-infodring.
Kapseldeponering	Prototypmaskiner under prov-drift i Äspö.	Ny och oprövad teknik, men en konceptuell deponeringsprocess finns beskriven. Denna inkluderar erforderlig utrustning. Stegvis utveckling krävs inklusive test i fullstor skala till avsett djup. Fel- och riskanalyser viktiga delmoment.
Buffert	Erfarenheter från flera försök, bl a Stripa. Fullskaleförsök planeras i Äspö.  Applicering under kontrollerade förhållanden.	Utbyte av borrhålsvatten med deponeringsslurry eller bentonit-block på stora djup är ny och oprövad teknik.  Kunskapsuppbyggnad erfordras om lämplig buffert i salt grundvatten och om praktiska förfaranden för att åstadkomma önskvärd kvalitet.
Återtagbarhet	Oprövad teknik i svälld bentonit men fullskaleförsök är planerade.	Beprövad teknik i form av "fiske" i borrhål men utveckling krävs för de mekaniskt känsliga förhållanden som gäller för kapslar med använt kärnbränsle (kapseln får ej skadas). Utveckling kräver test i fullstor skala.

I en eventuell framtida mer djupgående analys av konceptet djupa hål bör praktiska synpunkter vägas in ännu starkare än i tidigare utredningar. Vi bör i så fall undvika metoder som är oprövade och som kan bedömas ge svårigheter och koncentrera oss på enkla och praktiska förfaranden.

Ett naturligt första steg är att optimera konceptet med avseende på borrhåls-teknik och val av material och teknik för applicering av deponeringsslurry, foderrör och bentonit-block. Funktionen hos det härvid definierade systemet av komponenter måste beskrivas numeriskt, vilket kräver att de kopplade geotekniska processerna (svällning, konsolidering, kapselbärighet och kapselrörelser) modelleras med hänsyn till kemiska effekter.

I ett andra steg inventeras lämpligen möjliga alternativa utformningar av konceptet. I dagsläget bedöms följande steg vara angelägna:

- Att optimera den nuvarande utformningen av konceptet med avseende på geometri och utförande. Idag finns exempelvis bättre möjligheter att borra raka hål med stor diameter eller styra sådana hål i önskad riktning.
- Att använda foderrör av stål i stället för kopparbrons
- Att förbättra lerbuffertens isoleringsförmåga genom att öka deponeringsslurryns täthet. Ett förslag att åstadkomma detta är att blanda in högkompakterade bentonitpellets i slurryn genom att pressa in sådana efter deponering. Ett annat förslag är att framställa slurry med högre täthet genom att blanda bentonitgranulat med en avvägd mängd kalciumkloridlösning så att högsta möjliga täthet uppnås samtidigt som slurryn fortfarande går att pumpa.
- Att eliminera risken för stora interna rörelser i deponeringszonen genom att ersätta originalkonceptets system av kapslar med högkompakterade bentonitblock mellan med en kontinuerlig stapel av kapslar.

En mer radikal tänkbar variant av konceptet är att ändra hålets djup. Detta kräver bättre kunskap om hur egenskaperna hos bergmassan, särskilt den hydrauliska konduktiviteten och potentialen för tektoniskt betingade förskjutningar, ändras med djupet. Då kan det bli möjligt att motivera minskat djup till exempelvis 2,5 kilometer med 1,25 kilometers pluggzon och 1,25 kilometers deponeringszon. En sådan lösning skulle innebära att bergstabilitetsproblemen minskar och att vi kan öka håldiametern i deponeringszonen och därmed få plats med större kapslar. En analys av en sådan alternativ utformning av konceptet förutsätter emellertid att vi säkrare måste kunna värdera den hydrauliska bulkkonduktiviteten hos berget och transmissiviteten hos diskreta strömningsvägar som funktion av djupet med beaktande av grundvattenkemin. Om vi finner att förståelsen för bergfunktionen förblir ringa kan vi tänka oss att öka djupet till cirka sex kilometer. Att öka djupet ger emellertid större svårigheter när det gäller hålstabilitet. Följande delprojekt ses som angelägna vid utarbetande och värdering av varianter av konceptet:

- Att göra en fördjupad analys av grundvattenomsättningen i berggrund med varierande strukturell uppbyggnad.
- Att göra en fördjupad analys av hålstabiliteten som funktion av bergstruktur och håldiameter.
- Att optimera konceptet med hänsyn till djup och diameter hos hålen samt med hänsyn till kapseldimensioner och avfallsmängd

Sist, men inte minst, måste valet av buffertmaterial granskas. Eftersom buffertens huvudsakliga uppgift är att hålla kapslarna på plats är det inte självklart att bentonit är det bästa valet. Speciellt inte om det skulle visa sig att salthalterna i grundvattnet vida överstiger 100 g/l eller 10 procent.

### FoU 89:

Möjligheterna att förvara avfall i flera kilometer djupa borrhål har studerats av SKB. Preliminära resultat indikerar att denna strategi kan vara ekonomiskt gynnsam, men SKB påpekar att det idag ännu inte finns tillräckligt med underlag som tillåter en jämförelse. Hur SKB ämnar fortsätta sina studier framgår ej. SKI efterlyser här ett mer systematiskt program. SKB anger också att under 1990 en jämförande analys mellan KBS-3-metoden och djupa borrhål ska utföras. (SKI)

### FUD 92:

För VDH-metoden har man uppfattningen att berget utgör den huvudsakliga barriären medan de kapselomslutande barriärerna endast har liten betydelse. Orsaken till detta är oklar.

Vi uppfattar att VDH-metoden avfärdats främst med hänvisning till osäkerheter och dåligt kunskapsunderlag. Detta bör inte vara skäl till låg prioritet i ett forskningsprogram. (Göteborgs universitet)

För valet mellan alternativa slutförvar görs en redovisning av för- och nackdelar i vissa avseenden. En sådan redovisning kan accepteras för val mellan relativt likvärdiga förslag såsom KBS-3, långa och medellånga tunnlar. För alternativet djupa borrhål behövs en mera genomgripande belysning.

De djupa borrhålen är däremot en helt annan typ av lösning som erbjuder helt egna problem och fördelar. I denna lösning förlitar man sig mer på berget och mindre på kapslingen jämfört med övriga system. Vid en genomgång av SKB:s argument avseende de djupa borrhålen framkommer det att man egentligen inte påvisar direkta svagheter hos detta system, utan snarare en osäkerhet grundad på en lägre grad av kunskap, och en större osäkerhet avseende kostnaderna.

Den lägre kunskapsgraden beror delvis på att man inte utrett detta alternativ lika ingående som framför allt KBS-3-alternativet.

Institutet menar att återtagbarhet genom förvarskonstruktion och informationsbevarande i och för sig är av värde, men kan tänka sig att ge avkall på återtagbarheten om ett annat förvarssystem, t ex djupa borrhål, skulle visa sig innebära ett ytterligare skydd för människa och miljö. (SSI)

Det finns anledning att tro att en slutförvarsmetod som bygger på utnyttjande av djupa borrhål (VDH) kan vara en lösning på både de miljömässiga och säkerhetspolitiska problemen för ett slutförvar.

VDH-metoden bör utvärderas ytterligare och om metoden visar sig vara jämförbar med KBS-3-metoden bör, för att framtida generationer ska göra en oberoende prövning av alternativa slutförvaringsmetoder, en demonstrationsanläggning byggas även för ett VDH-slutförvar.

VDH-metoden innebär ett mycket stort förvaringsdjup. Den kan därför komma att bli en lösning på de miljömässiga problemen med vattengenomströmning i KBS-3-slutförvaret och risken för kraftig erosion vid landhöjning i kombination med framtida glaciation, som på det säkerhetspolitiska problemet med återkomligheten av vapenmaterial. (Naturskyddsföreningen)

SKI menar att SKB bör fortsätta med vissa insatser med djupa borrhål. Syftet med dessa skulle främst vara att värdera möjligheterna till att fylla viktiga kunskapsluckor. Först därefter blir det möjligt att fullt ut bedöma om alternativet skall avföras från mera omfattande studier.

En rad skäl, varav de flesta är säkerhetsrelaterade, talar för att djupa borrhål inte behöver studeras vidare som ett sammanhållet system. Det föreligger emellertid en oklarhet kring vilka insatser som skulle behöva göras för att få fram erforderlig kunskap kring bergets funktion, deponeringsteknik, m m. SKB bör göra en sådan värdering innan djupa borrhål eventuellt kan avföras från mera omfattande studier. (SKI)

#### **FUD 95:**

Förvaring på större djup än 500 m bör utredas (Universitetet i Uppsala, Kungliga vetenskapsakademien och Greenpeace).

Alternativet med djupa borrhål bedöms ha större potential vad gäller Kåberger/Swahns komplettering till KASAM-principen, om återkomlighet för kommande generationer (Universitetet i Göteborg/Chalmers tekniska högskola, Naturskyddsföreningen och Avfallskedjan). Greenpeace tycker att metoden bör studeras närmare och hållas öppen som ett alternativ till KBS-3-metoden.

Ett förslag till metod med djupa borrhål spridda i landet efter vissa kriterier lämnas av Avfallskedjan. Naturskyddsföreningen menar att borrhålen kan döljas under naturliga inhomogeniteter som lertäkter och konstrueras så att man vid behov enkelt kan åstadkomma en störning i bergmassan som döljer dem för geofysisk detektering. På att SKB hittills har negligerat den viktiga återkomlighetsprincipen har det gentekniska resonemanget runt detta förslag måst baseras på en bristfällig kunskapsnivå.

#### **FUD 98:**

Universitetet anser att berggrunden på större djup (2–4 km) kan vara av intresse för deponering av högaktivt kärnavfall, i synnerhet om avfallsmängderna kan minskas väsentligt. I Sverige är erfarenheterna av djupborrning begränsade. Enligt Uppsala Universitet borde SKB därför bevaka "International Continental Drilling Programme" och eventuellt delta aktivt i detta program. SKB borde dessutom överväga närmare samarbete med de länder (t ex Ryssland) som har/haft omfattande program för djupborrning i kristallin berggrund. (Uppsala universitet)

FUD 98 angriper alternativfrågan på ett oseriöst sätt. Alternativen till KBS-3 anges huvudsakligen vara uppskjutning i rymden och transmutation. Miljöpartiet saknar en utförlig diskussion kring djupa förvar samt förvar under sedimentär caprock. Man vill också se en diskussion om olika alternativa metoder av mellanlagring, eftersom en utökad sådan kommer att behövas om slutförvaret ej uppfyller myndigheternas säkerhetskrav. (Miljöpartiet de Gröna i Tierp)

Det finns inte längre någon saklig grund att som SKB gjort i FUD-98 helt avvisa en förvaring i djupa borrhål. För att bättre kunna värdera denna metod behövs dock ytterligare dokumentation av svenska urbergsförhållanden och SKB bör därför föreläggas att redovisa hur en förvaring i djupa borrhål skulle kunna ske inom landet. Detaljeringsgraden i redovisning borde minst motsvara nivån för ett referensalternativ i en MKB-process. Eftersom risken för att kärnavfall i ett bergförvar når biosfären grovt sett minskar med förvarsdjupen, kan förvar på större djup vara att föredra, givet att det kan byggas och etableras med bibehållen bygg- och driftsäkerhet. (Naturskyddsföreningen)

SSI ser djupa borrhål som ett principiellt fullvärdigt alternativ till KBS-3. Till skillnad mot upparbetning/transmutation framstår djupa borrhål sålunda som ett alternativ SKB måste hålla vid liv och fördjupa. Det ligger närmare den egna verksamheten och vinner på att drivas vidare i SKB:s regi. (SSI)

Det underlag som SKB kan redovisa vad gäller djupa borrhål som slutförvaringsalternativ är enligt FMKK tämligen magert. Enligt FMKK talar mycket för att detta alternativ har en avsevärt större säkerhetspotential än KBS-3-metoden i det långsiktiga perspektivet och vad gäller oavsiktligt eller avsiktligt intrång. (Folkampanjen mot kärnkraft/kärnvapen)

Lika höga krav måste ställas på bevisföringen för säkerheten i djuphålsförvaret om ställs på KBS-förvaret. I djuphålsförvaret ställs kraven i första hand på bevis för att grundvattnet kommer att vara isolerat från biosfären under mycket lång tid. De kärnbränslekapslar som deponerats på några kilometers djup kan svårligen återtas i oskadat skick. Detta kommer också att gälla, i högre eller mindre grad, om de fastnar i borrhålet på vägen ner. Deponeringstekniken måste visas vara så robust att detta inte inträffar.

Det är viktigt att SKB redovisar omfattningen och innehållet i ett FoU-program, som kommer att behövas för att slutförvaring i djupa borrhål ska kunna analyseras och bedömas på en med KBS-metoden likvärdig grund. SKB bör också göra uppskattningar av den tid och de resurser som behövs för att de, som har att ta ställning till frågan om redovisning av alternativ i MKB och i andra sammanhang, skall få en uppfattning om, vad det kommer att kosta att få två metoder att välja mellan i ett ärende där det ställs så höga krav på redovisningen som i detta fall. (Kasam)

En bedömning som SKB anger till att VDH aktualiserats är utvecklingen på borrhållens område. SKI vill också framhålla som ett skäl att ta upp VDH det mera allmänna intresse som visats för detta koncept, vilket också framgår av remissinstansernas kommentarer. Det är möjligheten till bättre isolering från biosfären och försvårandet av mänskligt intrång som framför allt anges som motivering till detta intresse. SKI kan hålla med om dessa synpunkter, men anser att de fördelar som metoden kan erbjuda fortfarande måste ställas mot nackdelarna, främst svårigheten med säkerhetsanalysen och att göra återtagning trovärdig.

SKB aviserar en systemanalys för VDH-konceptet, vilket SKI anser vara inte bara en god idé utan också nödvändigt om VDH kommer att jämföras med andra deponeringsmetoder. SKB anger att när väl systemanalysen föreligger skall en relativt omfattande funktions- och säkerhetsanalys utföras. Enligt SKI:s uppfattning är även detta ett bra initiativ, men ställer sig frågan om inte säkerhetsanalysen måste göras före funktionsanalysen.

SKI vill slutligen påminna om att tidsplanen för arbetena på VDH-konceptet kan behöva påskyndas med tanke på de redovisningskrav som SKI föreslår i samband med lokaliseringsprocessen. (SKI)