

Slutförvaring av högaktivt kärnavfall i djupa borrhål

En utvärdering baserad på senare års forskning om berggrunden på stora djup

Karl-Inge Åhäll

Maj 2006

Slutförvaring av högaktivt kärnavfall i djupa borrhål

En utvärdering baserad på senare års
forskning om berggrunden på stora djup

Karl-Inge Åhäll

Maj 2006

Om Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskning (MKG)

Den ideella föreningen Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskning (MKG) är en svensk miljöorganisation som bevakar kärnavfallsområdet. MKG bildades hösten 2004 och medlemsorganisationer i MKG är Fältbiologerna, Naturskyddsförbundet i Kalmar län, Naturskyddsföreningen i Uppsala län, Oss - Opinionsgruppen för säker slutförvaring i Östhammar och Svenska Naturskyddsföreningen.

MKG:s arbete finansieras med medel från Kärnavfallsfonden. Föreningen deltar i det pågående gransknings- och samrådsarbetet inför kärnavfallsindustrins planerade ansökan för att få bygga ett slutförvar för använt kärnbränsle. MKG har som syfte att verka för den på lång sikt miljö- och hälsomässigt bästa lösningen för omhändertagande av avfall från kärnteknisk verksamhet i Sverige.

Om författaren

Docent Karl-Inge Åhäll är berggrundsgeolog knuten till Karlstads universitet. I sin forskning, med fokus på berggrundsbildningen i västra Sverige, har han bl.a varit koordinator i en internationell forskargrupp med inriktning på tillkomst och förändringsprocesser av kontinental jordskorpa.

Karl-Inge Åhäll är ledamot i Svenska Naturskyddsföreningens expertråd, Svenska ILP-kommittén (en nationell avdelning inom International Lithosphere Program) och Miljöorganisationernas kärnavfallsgransknings (MKG:s) expertråd.

Utöver 30-talet vetenskapliga artiklar publicerade i internationella facktidskrifter har Karl-Inge Åhäll bl.a skrivit en populärvetenskaplig bok, *Geologi i Dalsland* (1993), en rapport för Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) om datering av unga graniter i östra Småland (SKB R-01-60) och medverkat vid utformningen av Svenska Naturskyddsföreningens policy för Geologiska naturvärden (1998).

Slutförvaring av högaktivt kärnavfall i djupa borrhål, MKG Rapport 1, maj 2006, Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskning
ISSN: 1653-6800

© Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskning (MKG), Box 7005, 402 31 Göteborg
info@mkg.se, 031 - 711 00 92

Rapporten finns digitalt på www.mkg.se

Figurer 1-3 är ritade av Mikael Kårelind, Ummagumma.
Framsidan är formgiven av Kenneth Gunnarsson.

Förord


Ett viktigt syfte för föreningen Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskning, MKG, är att verka för den på lång sikt miljö- och hälsomässigt bästa lösningen för omhändertagande av det använda kärnbränslet från de svenska kärnkraftverken. Detta mycket långlivade och miljöfarliga kärnkraftsavfall måste slutförvaras under mer än 100 000 års tid på ett sätt så att inte radioaktivitet läcker ut. MKG vill med publiceringen av denna rapport ge en uppdaterad och samlad bild av slutförvarskonceptet djupa borrhål för att på så sätt bidra till en mer allsidig diskussion inför valet av slutförvaringsmetod.

Den svenska kärnkraftsindustrin förespråkar sedan 1970-talet en slutförvaringsmetod som innebär att det använda kärnkraftsbränslet deponeras i relativt yttnära tunnlar på 500 m djup. Det finns dock andra alternativ för slutförvaring. Ett av dessa är djupa borrhål, som innebär att man deponerar kärnavfallet i borrhål på 3-5 km djup.

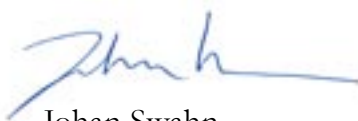
Enligt miljöbalkens krav ska alla realistiska metodalternativ jämföras vid prövning av tillstånd för miljöfarlig verksamhet. Miljöorganisationerna har sedan 1990-talets början agerat för att djupa borrhål ska utredas ytterligare. MKG konstaterar att en oberoende och förutsättningslös utvärdering av den alternativa metoden djupa borrhål fortfarande saknas, trots upprepade krav på en sådan från både miljöorganisationer, myndigheter och regering.

För att uppdatera och ge en mer samlad bild av konceptet djupa borrhål har MKG anlitat berggrundsgeologen docent Karl-Inge Åhäll för en utvärdering av konceptets förutsättningar. Författaren har tagit särskild hänsyn till senare års kunskapsutveckling rörande geodynamiska och hydrologiska förhållanden i äldre kontinental berggrund av den typ som dominerar inom Sverige.

Rapportens bedömningar är författarens egna. Rapporten har ursprungligen tillkommit på initiativ av Naturskyddsföreningen i Uppsala län och Oss - Opinionsgruppen för säker slutförvaring i Östhammar. MKG har vidareutvecklat rapporten och publicerar den som ett led i föreningens strävan att bidra till en mer allsidig belysning av kärnavfallsfrågan.



Catharina Lihnell Järnhester
Ordförande MKG



Johan Swahn
Kanslichef MKG

Sammanfattning

I denna rapport utvärderas metoden djupa borrhål för slutförvaring av högaktivt kärnavfall, t.ex. använt kärnbränsle, i ljuset av senare års forskning om berggrunden på stora djup. Granskningen visar att ny kunskap och landvinningar inom hydrogeologi och borrhållsteknik har ökat möjligheten att använda djupa borrhål för en slutförvaring av det svenska kärnavfallet. Avgörande är att slutförvaret kan placeras i stabil berggrund på nivåer där grundvattnet saknar kontakt med biosfären och att deponering och förslutning kan ske utan att grundvattnets densitetsskiktning långsiktigt störs utanför deponiområdet.

En fördel, jämfört med ett ytnära slutförvar av KBS-3-typ som nu förbereds i Sverige, är att ett borrhållsförvar har förutsättningar att bli mer teknologiskt robust. Det beror på att konceptet djupa borrhål tycks tillåta en så djup deponering av kärnavfallet att hela deponiområdet skulle omges av ett stabilt densitetsskiktat grundvatten utan kontakt med marknära nivåer medan ett KBS-3-förvar skulle omges av ett rörligt grundvatten i kontakt med marknära nivåer. Denna hydrogeologiska skillnad har stor betydelse för säkerheten, vilket blir särskilt tydligt i scenarier med utläckage av radioaktiva ämnen. Ett borrhållsförvar på 3-5 km djup kan därför mindre sårbart för såväl förväntade händelser (t.ex. ändrade grundvattenförhållanden under kommande istider) som oönskade händelser (t.ex. terroristaktioner, teknologiska missgrepp eller större jordskalv i förvarsområdet). Avgörande är dock att avfallet kan deponeras på avsett djup i borrhålen utan haverier, vilket förutsätter ny forskning liksom fortsatt teknikutveckling.

Innehållsförteckning

1. Det svenska kärnavfallsprogrammet	1
2. Bakgrund till denna studie	1
3. Slutförvaring i djupa borrhål - en översikt	4
3.1 Hur djupt bör en kärnavfallsdeponi placeras?	4
3.2 Två olika borrhålskoncept	5
3.2.1 Lågtemperaturförvar (LT-förvar)	5
3.2.2 Högtemperaturförvar (HT-förvar).	8
4. Förhållandena på 3-5 km djup	9
4.1 Faktorer som motverkar spridning av radioaktiva ämnen på stora djup	11
4.1.1 Bergets låga permeabilitet	11
4.1.2 Grundvattnets densitetsskiktning	11
4.1.3 Geokemiska processer	13
4.2 Faktorer som kan främja spridning av radioaktiva ämnen	13
4.2.1 Förekomsten av större sprickzoner	13
4.2.2 Uppvärmningen av berget runt avfallsbehållarna	14
4.2.3 Borrhålens förslutning	14
4.2.4 Biokemisk påverkan på förvaret	15
4.2.5 Förändringar i samband med kommande istider	15
5. Förutsättningar för slutförvar i djupa borrhål	16
6. Kan dessa förutsättningar infrias?	17
7. Konceptet djupa borrhål - en samlad bedömning	23
8. Referenser	26

1. Det svenska kärnavfallsprogrammet

Sedan starten 1972 har svenska kärnkraftverk producerat högaktivt radioaktivt avfall i form av använt kärnbränsle. Efterhand har detta avfall placerats för avkylning i en särskild anläggning (CLAB) i anslutning till kärnkraftverket norr om Oskarshamn.

Arbetet med att finna en långsiktigt acceptabel metod för att ta hand om det högaktiva avfallet inleddes på 1970-talet. Efter att ha släppt tanken på upparbetning av avfallet, presenterade kärnkraftsindustrin 1983 KBS-3-metoden för en direkt slutförvaring av använt kärnbränsle. Metoden innebär att allt högaktivt kärnavfall ska kapslas in i behållare som deponeras i gruvgångliknande tunnlar på ca 500 m djup i svensk berggrund. Alltsedan dess har kärnkraftsindustrin genom sitt dotterbolag, Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), koncentrerat sina insatser på två saker: att finna en lämplig plats för ett KBS-3-förvar och att precisera hur ett sådant slutförvar ska utformas för att minimera riskerna på kort och lång sikt.

2. Bakgrund till denna studie

Tanken att slutförvara kärnavfall på flera kilometers djup i berggrunden är inte ny. Men det var först på 1990-talet som man mer allmänt insåg betydelsen av de nya forskningsresultat som indikerar att det, åtminstone i vissa områden, finns en så stabil densitetsskiktning att grundvattnet på större djup saknar kontakt med biosfären.

Exempelvis lyfte William G. Halsey vid Lawrence Livermore National Laboratory, University of California, fram dessa nya hydrogeologiska data i en amerikansk studie om slutförvaring av militärt kärnavfall i djupa borrhål (Deep Borehole Disposition, 1996) i en av energidepartementet initierad granskning (Fissile Material Disposition Program).

“The basic safety argument is permanent isolation in deep, old and stable rock from which water does not communicate with the accessible biosphere.”

[Säkerhetsmässigt avgörande är att avfallet placeras djupt nere i stabilt urberg där grundvattnet saknar kontakt med biosfären.]

I Sverige påtalades dessa nya forskningsresultat tidigt av bland andra Christopher Juhlin, Uppsala universitet, men fick större spridning först 1998 då djupdata sammanställdes i en större SKB-studie av Juhlin m fl (SKB TR-98-05).

Under senare år har det kommit mer detaljerad information om förhållandena på stora djup i kontinental berggrund av den typ som finns i Sverige. Förhållandena styrs främst av det högre tryck och den högre temperatur som råder där nere.

Andra faktorer är bergets sammansättning och sprickighet samt grundvattnets kemi, skiktning och bakterieinnehåll. Genom att mäta dessa och andra parametrar kan man bedöma de för ett borrhålskoncept mest avgörande frågorna:

Hur djupt ner i berggrunden måste man söka sig för att nå ett så stabilt densitetsskiktat grundvatten att slutförvaret kan förläggas under den ”övre zon” där grundvattnet har kontakt med biosfären?

Vilka andra geologiska och hydrogeologiska förutsättningar behöver infrias för ett slutförvar i djupa borrhål?

Vilka faktorer motverkar en spridning av radioaktiva ämnen på stora djup?

Vilka faktorer kan hota säkerheten på kort eller lång sikt?

Finns teknik som klarar de krav på borrhålsprecision, säker deponering och långtidssäkerhet som en djup borrhålsdeponering av kärnavfall förutsätter?

Den nya kunskapen om förhållandena djupt nere i kontinental berggrund kommer främst från mätningar i djupa borrhål i Europa, Nordamerika och Japan:

- Kolahalvön, NV Ryssland: 12,3 km djup (världens djupaste borrhål, SG-3 projektet),
- Uralbergen, centrala Ryssland: 5,4 km djup (SG-4),
- Södra Tyskland: två borrhål, 4 och 9 km djupa (KTBV- och KTBH- projektet),
- Östra Frankrike: två borrhål, 3,6 och 5 km djupa (GPK 1 och 2),
- Centrala Frankrike: flera borrhål, 1-2 km djupa (Sancerre-Couy, Cezalier),
- Cornwall, SV England: flera borrhål, 1-2 km djupa (RH 11, 12 och 15),
- USA: fyra borrhål, 4-6 km djupa (Mobile-1, Nellie-1, Fenton Hill och Haraway 1-27),
- Japan: 1,8 km djup (Nojima Fault zone).

Utöver publicerade forskningsresultat från djupa borrhål finns mycket djupdata från oljebolagens prospekteringsverksamhet. Dessa kan dock vara svårtillgängliga av kommersiella skäl. Vidare finns data från djupa gruvor i Sydafrika och Kanada där man nått ner under 2,5 km. Viktiga data kommer också från seismiska studier som gjorts i samband med jordskalv.

I Sverige finns djupa borrhål i 3 olika områden:

- Siljanområdet (Gravberg & Stensberg): två borrhål ca 6 km djupa (kommersiellt djupgasprojekt).
- Utanför Lund: 3,7 km djup (anlagt för geotermisk energi),
- Laxemar, östra Småland: 1,7 km djup (SKBs kärnavfallsprogram).

I Sverige finns också data från gruvor och prospekteringsborrningar som nått 1 km-nivån, bland annat i Kirunaområdet, Skelleftefältet och Bergslagen. Den ökade kunskapen om förhållandena på stora djup innebär att man nu kan göra mer allsidiga värderingar av fördelar och nackdelar med slutförvar i djupa borrhål jämfört med när man på 70-talet inledde det svenska kärnavfallsprogrammet med dess fokusering på ett relativt ytnära slutförvar (ca 500 m). Mest betydelsefull är upptäckten att det finns områden som har ett så stabilt densitetsskiktat grundvatten på 3-5 km djup att denna skiktning radikalt försvårar all vertikal migration (transport) i berggrunden.

Vidare har senare års teknikutveckling möjliggjort borrning av tillräckligt breda och djupa deponeringshål för kärnavfallsbehållare, vilket medfört att man nu kan göra långt mer realistiska kostnadskalkyler. Därtill finns idag en bredare insikt om värdet av att använda en ”förlåtande teknik” för att minimera de risker som alltid finns med tekniskt komplexa system och mänskliga tillkortakommanden. En sådan prioritering av mer teknologiskt robusta system ligger också i linje med försiktighetsprincipen och kravet att använda bästa möjliga teknik, två centrala begrepp i den svenska miljölagstiftningen.

Sammantaget medför dessa nya kunskaper och åtaganden att man nu kan göra mer inträngande analyser av de fördelar och nackdelar som finns med en slutförvaring i djupa borrhål jämfört med andra typer av kärnavfallsförvar.

Behovet att uppdatera sina kärnavfallsprogram gäller förstås inte bara Sverige. I USA sammanfattades exempelvis kärnavfallsproblematiken år 2003 i följande slutsats efter en omfattande interdisciplinär studie vid Massachusetts Institute of Technology (MIT 2003, sid 11):

”A research program should be launched to determine the viability of geologic disposal in deep boreholes within a decade”.

[Ett forskningsprogram bör inledas för att inom en tioårsperiod klarlägga genomförbarheten av slutförvaring i djupa borrhål.]

Det nya intresset i USA för konceptet djupa borrhål motiverades bland annat med den ökade säkerhet som en kärnavfallsförvaring i djupa borrhål bedömdes kunna ge. Efter att först ha redovisat vissa organisatoriska och tekniska hinder att bemästra drar man följande slutsats (MIT 2003, sid 57):

”Despite these obstacles, we view the deep borehole disposal approach as a promising extension of geological disposal, with greater siting flexibility and the potential to reduce the already very low risk of long-term radiation exposure to still lower levels without incurring significant additional costs.”

[Oavsett dessa hinder finner vi att en slutförvaring i djupa borrhål är en lovande utvidgning av konceptet geologisk slutförvaring, med större flexibilitet vad gäller lokalisering och med en möjlighet att minska de redan väldigt låga långsiktiga strålningsriskerna till än lägre risknivåer utan att det skulle medföra väsentligt ökade kostnader.]

3. Slutförvaring i djupa borrhål - en översikt

All berggrund förändras med ökande djup och redan under 1,5 km finns betydande skillnader i bergtryck, sprickighet och grundvattenkemi. Ett slutförvar på stora djup förutsätter avancerad borrhåsteknik, främst för att skapa tillräckligt breda borrhål för de behållare med kärnavfall som ska deponeras. Vidare krävs relativt omfattande borrhåsprogram för att skapa sonderande borrhål för de mätningar som behövs för att undersöka bergets geologiska och hydrogeologiska egenskaper i det tilltänkta deponiområdet.

Fördelen med en djup deponering ligger främst i bergets mycket lägre permeabilitet (genomsläpplighet) av vatten och gaser och grundvattnets mycket mer stabila skiktning. Vidare skulle det högre tryck och temperatur som finns på stora djup gynna geokemiska sorptionsprocesser (vidhäftning) i bergets mikrosprickor om radioaktiva ämnen skulle läcka ut från förvaret (SKB T-98-05, SKB R-04-09). Dessa tre faktorer ökar säkerheten då de, såväl var för sig som tillsammans, försvårar all långväga migration (transport) av eventuellt utläckande radioaktivitet. I synnerhet försvåras transporten uppåt mot biosfären eftersom all vertikal migration motverkas ju stabilare grundvattnets skiktning är.

3.1 Hur djupt bör en kärnavfallsdeponi placeras?

Säkerhetsmässigt avgörande är att man med god marginal förlägger förvaret under den ”övre zon” i berggrunden som domineras av relativt öppna och vattenförande sprickor. Under denna zon sker en övergång mot alltmer slutna sprickor, vilket ökar bergmassans homogenitet, vilket bl.a avspeglas i stigande seismiska våghastigheter (t.ex SKB TR-98-05, avsnitt 14.1). Detta första ”villkor” för konceptet djupa borrhål förutsätter ett förvaringsdjup på minst 1,5 km.

Behovet att etablera en bred ”hydrologisk buffertzona” mellan avfallsdeponin och berget ovanför med rörligt grundvatten, medför ett andra ”villkor” för deponeringsdjupet. Här kan man använda sig av den med djupet allt stabilare skiktning som grundvattnet har under denna ”övre zon” för att uppnå en tillräckligt bred buffertzona. Grundvattnets skiktning är densitetsrelaterad och beror på att den ”övre zonens” grundvatten mot djupet ersätts av allt saltare och därmed allt tyngre grundvatten. Svenska mätdata från bl.a Siljanområdet (Gravberg 1) tyder på att det finns områden där detta andra ”villkor” inte infrias förrän på 5-6 km djup (Juhlin et al., 1991), medan andra områden tycks ha en tydlig densitetsskiktning redan strax under 1 km djup (Laxemar, östra Småland, SKB TR-01-11). Vidare finns motsvarande data från utländska urbergsområden (SKB R-04-09), vilket tyder på att det bör finnas flera

områden inom landet där förvaringsdjupet kanske inte behöver överstiga 2,5 km även om man vill ha en kilometerbred buffertzonen mellan avfalls-deponin och berget ovanför med öppna sprickor och rörligt grundvatten.

Det svenska kärnavfallsbolaget SKB har i sina rapporter om djupa borrhål utgått från en deponering mellan 2 och ca 4 km (SKB R-00-28). I dessa mycket översiktliga redovisningar finns dock ingen mer inträngande analys rörande buffertzonen bredd eller vilket deponidjup som sammantaget vore mest lämpligt. Exempelvis medför istidsproblematiken att man kan ifrågasätta lämpligheten av en deponering så högt upp som 2 km.

Då borrhåskostnaden ökar med deponeringsdjupet finns skäl att inte gå onödigt djupt. Samtidigt finns parametrar (som grundvattnets densitetsskiktning) som talar för en ökad säkerhet ju djupare avfallet placeras. Denna målkonflikt gör att olika intressen kan förväntas förorda olika deponeringsdjup under 2 km.

För att inte underskatta problemen med att etablera ett slutförvar i djupa borrhål har författaren i denna rapport utgått från en deponering i borrhål mellan 3 och 5 km. En fortsatt teknikutveckling av bredhålsborrningen gör dock att det senare kan bli ekonomiskt attraktivt att även deponera under 5 km.

Utöver deponihålen behövs också sonderande borrhål för mätningar av flera parametrar för att klarlägga bergets geologiska och hydrogeologiska egenskaper. Några parametrar kan klaras med hjälp av geofysiska mätningar från markytan men inte alla. Exempelvis behövs sonderande borrhål ned till aktuella förvaringsdjup för att fastställa hur länge grundvattnet på dessa nivåer varit utan kontakt med ett ytnära grundvatten. Sonderande borrhål behöver inte vara lika breda som deponihålen. Däremot måste några gå ännu djupare eftersom man också behöver ha god kontroll på förhållandena i berggrunden närmast under förvaret. Därför behövs sonderande borrhål som fortsätter flera hundra meter förbi det tänkta deponidjupet.

3.2 Två olika borrhålskoncept

Idag finns två systemtekniskt mycket olika koncept för slutförvar i djupa borrhål. Flest studier har gjorts på lågtemperaturförvar (LT-förvar) men sedan några år tillbaka finns även data för ett högtemperaturförvar (HT-förvar). Systemtekniskt kräver HT-förvar en tätare packning av kärnavfallet, se avsnitt 3.2.2, vilket möjliggör färre borrhål och ett mindre deponiområde.

3.2.1 Lågtemperaturförvar (LT-förvar)

Ett LT-förvar bygger på att man begränsar förvarets värmepåverkan på omgivande berg genom att välja en förhållandevis låg koncentration av radioaktiva ämnen i avfallsbehållarna. Vidare kan man sprida värmeeffekten av det radioaktiva sönderfall som allteftersom sker inne i behållarna till ett större område genom att dels

placera buffertmaterial mellan behållarna i borrhålen och dels placera deponin i berggrund med god värmeledningsförmåga. Med sådana åtgärder kan man reglera värmeeffekten på omgivande berg, vilket gör att deponiområdet efter deponering och förslutning av borrhålen förväntas omges av områdets normala grundvatten, vilket i sin tur gör att man relativt enkelt kan modellera hur en sådan kärnavfallsdeponi skulle fungera.

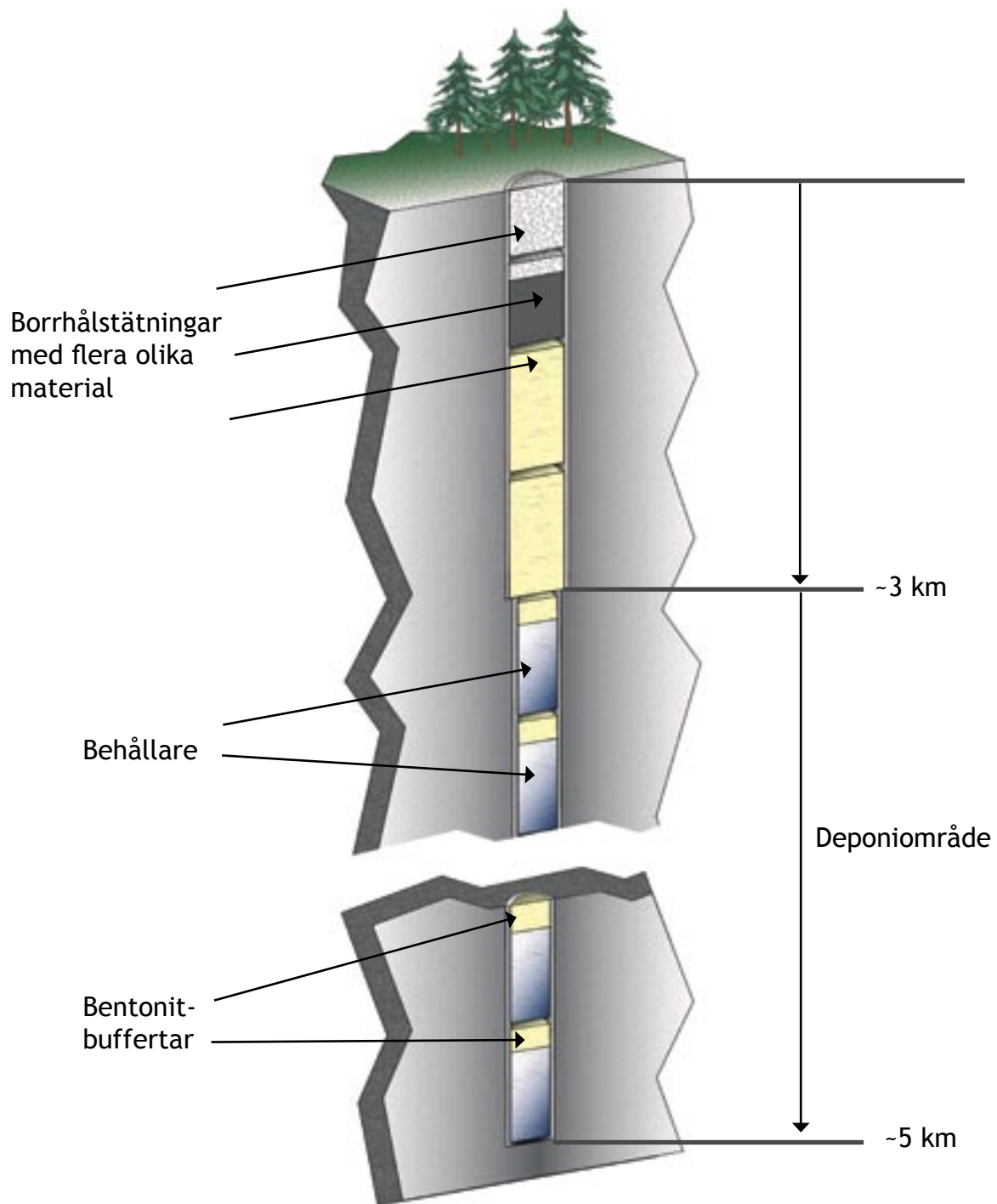
Tanken med LT-förvar är således att man utanför deponiområdet ska ha kvar ett så ostört berg som möjligt, och därmed en stabil grundvattenskiktning, så att radioaktiva ämnen inte kan nå upp till biosfären även om flera avfallsbehållare skulle börja läcka.

Principerna för ett LT-förvar i djupa borrhål framgår av figur 1. Borrhåls- och kapseldimensioner kan dock behöva modifieras av kostnadsskäl (SKB R-00-35, sid 45); likaså det av SKB angivna deponeringsdjupet 2-4 km. Vidare har man övervägt att ha andra buffertmaterial än bentonit mellan avfallsbehållarna, åtminstone på större djup (se SKB R-00-28, sid 64-65).

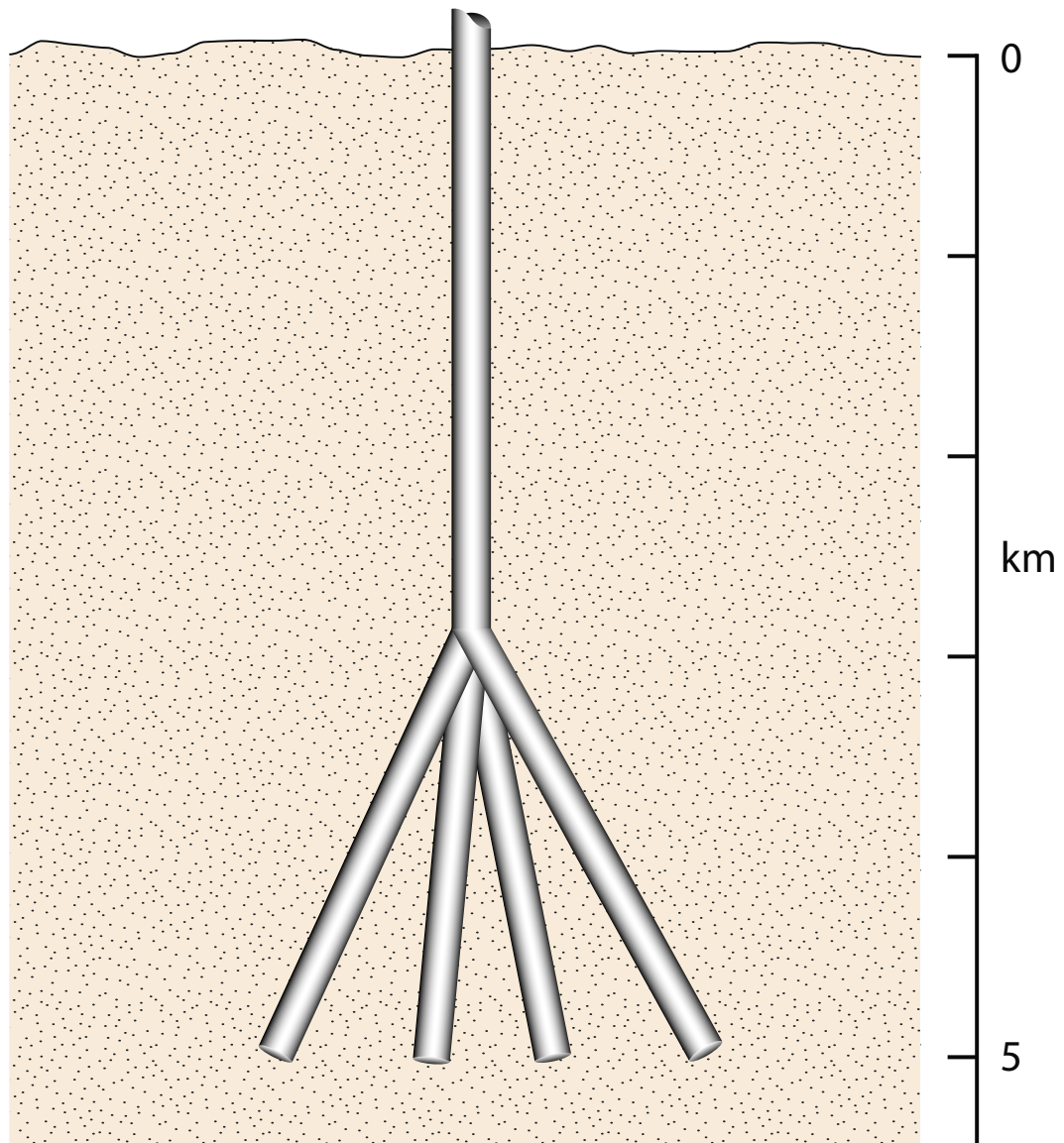
Det bör också noteras att en deponering i djupa borrhål inte förutsätter att kärnavfallet innesluts i några behållare eftersom det också skulle kunna deponeras i form av mindre ”kutsar” i en lättflytande cementblandning som efter deponeringen stelnar nere i borrhålet. Men i avsaknad av jämförbart referensmaterial för att bedöma tillförlitligheten för denna deponeringsmetod har jag valt att enbart granska slutförvar där man använder behållare så som redovisas i figur 1.

LT-systemets krav på låg koncentration av radioaktiva ämnen tycks inte innebära några större problem för det svenska kärnavfallet (SKB R-00-28). Det beror på att avfallet placeras i ett så kallat mellanlager utanför Oskarshamn (CLAB) under 15-50 år, vilket gör att avfallet under tiden hinner kallna så mycket att det utan större olägenheter tycks kunna deponeras i ett LT-förvar så som skisserats i figur 1.

I tidigare SKB-rapporter (TR-98-05 och R-00-28) anges att man skulle behöva 20-40 borrhål beroende på hur avfallet förbehandlades. Med en borrhålsrigg skulle så många deponeringshål ta 10-15 år att färdigställa och före det skulle det behövas åtskilliga sonderande borrhål för att välja ut lämpliga områden. Med den kostnadsberäkning som redovisas i SKB R-00-35 (ca 40 miljoner kronor per borrhål) skulle borrhålskostnaden för deponeringshålen vara i storleksordningen 1,5 miljarder. Dessa beräkningar behöver emellertid uppdateras då senare års teknikutveckling kan ha påverkat borrhålskostnaderna. Vidare kan dagens borrhålsoperatörer klara mer precisa borrhålsarrangemang, bland annat att göra en serie borrhål som utgår från ett gemensamt ”övre centrumhål” långt nere i berggrunden, ett så kallat ”fanned array” (Chapman & Gibb 2003), se figur 2 på nästa uppslag.



Figur 1: Principskiss för slutförvaring av kärnavfallsbehållare deponerade i djupa borrhål som därefter förslutits. Behållarna med kärnavfall är ungefär 5 meter höga och 0,5 meter breda. Skissen utgår ifrån en figur i SKB R-00-28, sid 8. I den rapporten anges borrhåldiametrar på 0,6-0,8 m.



Figur 2. Exempel på tekniskt avancerad djupborrning; ett så kallat ”fanned array” med flera deponeringshål utgående från ett gemensamt övre borrhål (modifierad efter Chapman & Gibb 2003, sid 32).

3.2.2 Högtemperaturförvar (HT-förvar).

Jämfört med LT-förvar förutsätter denna form av slutförvar en mycket högre koncentration av kärnavfall i deponiområdet. Det kan uppnås med en högre koncentration av radioaktiva ämnen i behållarna och genom att dessa placeras så tätt att de, efter deponering och förslutning av borrhålen, skulle avge så mycket värme att närmast omgivande berg börjar smälta (partiell uppsmältning). I inledningsskedet av denna process driver den ökande värmen successivt iväg bergets gas- och vätskeformiga ämnen, bort från deponiområdet. När deponiområdet sedan svalnar, kommer avfallet

att inneslutas i en inre zon med nykristalliserat torrt berg som utåt omges av flera fysiska och geokemiska buffertzoner. Dessa zoner skulle försvåra allt utbyte mellan avfallet och det berg som finns utanför de värmepåverkade zonerna kring deponin. Denna typ av HT-förvar har främst beskrivits av en forskargrupp vid University of Sheffield (se Gibb 2000 och Attrill & Gibb 2003a och 2003b samt referenser däri).

I figur 3, på följande sida, redovisas de geokemiska zoner med ”termiskt tätat berg” som skulle omge ett HT-förvar när det partiellt uppsmälta berget har kristalliserat. Tanken med HT-förvar är således inte bara att förvaret skulle omges av en zon med tätt nykristalliserat berg, utan att hela deponiområdet omsluts av flera yttre zoner med metamorft omvandlat berg, inom vilka vätske- och gasformiga ämnen antingen drivits iväg eller blivit stabilt kemiskt bundna i nykristalliserade mineral.

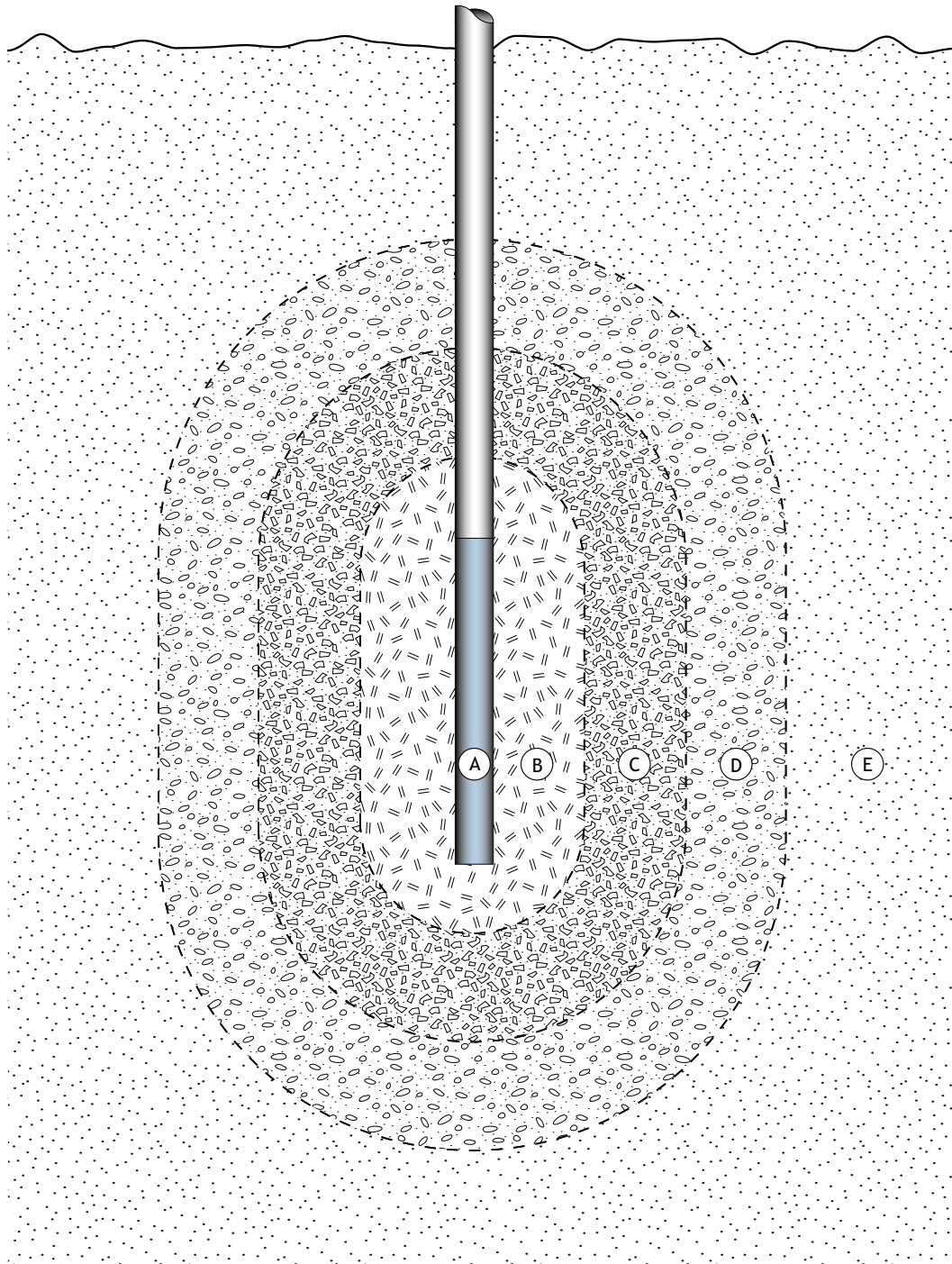
En fördel med HT-förvar är att de tillåter en mycket tätare packning av kärnavfallet, vilket sänker borrhkostnaden. Därtill bedöms metoden lämplig även för kvittblivning av plutonium och andra kärnvapenråvaror, vilket skulle erbjuda FN-organ som IAEA (International Atomic Energy Agency), liksom enskilda kärnvapenstater, en metod att en gång för alla bli av med ännu aktiva kärnvapenråvaror och därmed minska risken för spridning till terroristgrupper.

HT-system av denna typ är ett relativt nytt koncept (Gibb 1999) och för att bedöma systemets fördelar och nackdelar fordras mer säkerhetsrelaterade uppgifter. Dock bör noteras att forskargruppen vid University of Sheffield via försök har kunnat verifiera sina modellberäkningar; bland annat har man visat att konceptets grundtankar skulle fungera energimässigt förutsatt att en lämplig värdbergart väljs (Attrill & Gibb 2003a och 2003b). Vidare står klart att denna typ av värdbergarter (graniter av S-typ) är relativt vanliga i all kontinental berggrund, och att detta även gäller Sverige.

4. Förhållandena på 3-5 km djup

Kunskapen om förhållandena på 3-5 km djup summerades nyligen i en engelskspråkig rapport (SKB R-04-09; Recent geoscientific information relating to deep crustal studies). Studien, gjord av John Smellie, Conterra AB, kan sägas uppdatera en liknande SKB-rapport från 1998 (Juhlin et al. 1998; TR-98-05). Ytterligare data och bedömningar finns i vetenskapliga artiklar av forskargruppen vid University of Sheffield (se t.ex. Gibb 2000, Attrill & Gibb 2003a och 2003b) samt i en interdisciplinär sammanställning gjord vid Massachusetts Institute of Technology (MIT 2003, 53-63).

Då dessa rapporter innehåller sammanställningar av publicerade forskningsresultat, har min granskning koncentrerats på de faktorer som är mest kritiska för den långsiktiga säkerheten för en kärnavfallsdeponi i djupa borrhål. Först redovisas tre faktorer som anses motverka en spridning av radioaktiva ämnen på 3-5 km djup, se avsnitt 4.1, sedan de faktorer som kan främja en sådan spridning, se avsnitt 4.2.



Figur 3. Principskiss för ett högtemperaturförvar i djupa borrhål (modifierad efter Gibb 2000, sid 29). A = behållare med kärnavfall (här representerande hela slutförvaret), B = inre zon med torrt, nykristalliserat berg som efteråt skulle omge avfallet, C = zon med metamorft omkristalliserat berg, D = zon med tätare berg efter hydrotermala processer i mikrosprickor mm., och E = opåverkad berggrund.

4.1 Faktorer som motverkar spridning av radioaktiva ämnen på stora djup

Senare års forskning har påvisat faktorer i berg och grundvatten på stora djup som motverkar eller fördröjer spridning av radioaktiva ämnen.

4.1.1 Bergets låga permeabilitet

Bergets permeabilitet (genomsläppligheten för grundvatten och gaser) sjunker i allmänhet med djupet och kan vara så låg som 10^{-16} m/s på stora djup. Dessa data från djupa borrhål i södra Tyskland stämmer rätt väl med resultaten från Kolahalvön (mindre än 10^{-16} m/s mätt över en kilometerbred zon) även om de olika mätmetoderna försvårar direkta jämförelser. Referenser och mer utförliga resultat finns i SKB R-04-09, sid 9-13.

Dessa låga värden på bergets permeabilitet medför att de studerade sektionerna i praktiken saknar grundvatten som är rörligt på 3-5 km djup. Förklaringen anses vara att trycket därnere är så högt att det pressar ihop existerande sprickighet så att det grundvatten som trots allt finns i bergets mikrosprickor och porositet saknar öppna transportvägar, vilket minimerar all migration (transport) av vatten och gaser genom bergmassan. Som jämförelse kan nämnas att permeabiliteten är flera tiopotenser högre i den ”övre zon” i berggrunden som domineras av ett ytnära grundvatten.

Sammantaget tyder nu kända permeabilitetsdata på att det i allmänhet bara är områden med större sprickzoner i berget som har en så hög permeabilitet på 3-5 km djup att det skulle medge transport av grundvatten och däri befintliga ämnen. Denna mobilitet skulle dock vara begränsad till närområdet kring sådana sprickzoner.

Forskningsresultaten om bergets låga permeabilitet på större djup anses nu så entydiga att äldre kontinental berggrund av den typ som dominerar i Sverige (”urberg”) förväntas sakna rörligt grundvatten på 3-5 km djup utanför alla större sprick- och rörelsezoner (se sammanställning i SKB R-04-09, sid 24-25). Dessa bedömningar stöds också av mätdata från djupborrningarna vid Siljan där den djupaste mätserien (under 5,4 km, Gravberg 1) visade mycket låg permeabilitet (se sammanställning av Juhlin et al. 1998, SKB TR-98-05, kap 10). Tyvärr saknas mätdata för intervallet 3-5 km och några andra svenska permeabilitetsdata från sådana djup har inte redovisats.

4.1.2 Grundvattnets densitetsskiktning

Berggrund under 3 km djup kan ha grundvatten som är så mycket saltare, och därmed tyngre, att det förblir stabilt densitetsskiktat även under så långa tidsperioder som årmiljoner (se sammanställning i SKB R-04-09, sid 24-25). Upptäckten av denna över tid stabila densitetsskiktning är mycket betydelsefull eftersom det

innebär att det finns stora sammanhängande områden på 3-5 km djup som helt saknar utbyte med det grundvatten som finns högre upp och som är i kontakt med biosfären.

Grundvattnets, över tid, stabila densitetsskiktning på större djup är en mycket viktig säkerhetsfaktor för alla typer av djupförvar. I kärnavfallssammanhang betonades denna stabila skiktning redan 1996 i den amerikanska studien (Deep Borehole Disposition) i en av energidepartementet initierad granskningsrapport (Fissile Material Disposition Program). I Sverige påtalades dessa viktiga forskningsresultat tidigt av bland andra Christopher Juhlin, Uppsala universitet, men fick större spridning först 1998 då de sammanfattades i en större SKB-studie (SKB TR-98-05) av Juhlin m fl. med orden:

“The chemistry, isotopic character and high gas content show that these brines have been stable for periods of millions to possibly hundreds of million years.”

[Den kemiska sammansättningen, isotopförhållandena och den höga halten gaser visar att detta salta grundvatten har varit stabilt skiktat under flera miljoner år, kanske hundratals miljoner år.]

Flera senare studier har bekräftat grundvattnets över tid stabila skiktning, se sammanställning om Hydraulic conductivity och Hydrochemistry i SKB R-04-09, sid 24-25. Viktigt är också att resultaten har styrkts genom mätningar av flera olika parametrar, bl.a vattenkemi och isotopsammansättningar. Vidare finns belägg i form av sprickmineral och ”fluid inclusions”. Några mer systematiska studier av grundvattnets densitetsskiktning på större djup i Sverige har dock ej gjorts. Däremot finns lokala mätdata från Gravberg 1 i Siljanområdet (Juhlin et al., 1991) liksom östra Småland (Laxemar, SKB TR-01-11) vilka styrker att den nu befintliga densitetsskiktningen på båda dessa platser varit stabil över så lång tid som en miljon år (SKB TR-98-05, sid 92).

Sammantaget visar nu tillgängliga data två saker. Dels att det finns urbergsområden där grundvattnet har en stabil densitetsskiktning på större djup och dels att denna skiktning kan bevaras över så långa tidsrymder som årmiljoner. Kombinationen av en stabil densitetsskiktning och låg permeabilitet på 3-5 km djup medför dessutom säkerhetsmässiga fördelar. Det beror på att även om det skulle finnas sprickzoner med högre permeabilitet i närheten av deponiområdet, så skulle alla grundvattenrörelser i vertikalled hämmas av den befintliga densitetsskiktningen.

Förenklat kan detta jämföras med havets densitetsskiktning som hindrar det saltare och därmed tyngre bottenvattnet att komma upp genom havets så kallade språngskikt. I havet sker ändå en viss uppblandning med det

lättare ytvattnet över tid. Men för att det ska ske krävs tillskott av energi i form av vågrörelser eller strömmar. I normal kontinental berggrund på 3-5 km djup, dvs utanför områden med större sprickzoner, ung vulkanism eller annan geotermisk aktivitet, finns inga energiflöden som kan ändra grundvattnets densitetsskiktning. Därför kan bergets grundvattensskiktning på större djup förbli stabil även över så långa tidsperioder som årmiljoner.

4.1.3 Geokemiska processer

Det höga tryck och den temperatur som finns på 3-5 km djup anses medföra en snabbare sorption (vidhäftning) av eventuellt utläckande ämnen. Det beror på att geokemiska processer, som bildning av sprickmineral, i allmänhet främjas av den högre temperatur (60-105 °C) som finns på dessa djup i äldre kontinental berggrund. Noterbart är också att flera geokemiska studier av sprickmineral och däri befintliga gasformiga ämnen har bekräftat grundvattnets stabila skiktning på 3-5 km djup (SKB R-04-09, sid 25; Möller et al. 1997).

Vidare tycks särskilt långlivade radionukleider som teknetium-99 och neptunium-237 vara mycket svårösliga i det syrefria grundvatten som påvisats på stora djup (MIT 2003, sid 56). Att bevara den syrefria grundvattenmiljön i förvarsområdet är därför en betydelsefull säkerhetsfaktor. Det förutsätter förtänksamhet vid val av borrhälsmaterial och material i avfallsbehållare, avståndsbuffertar och borrhålstätningar.

4.2 Faktorer som kan främja spridning av radioaktiva ämnen

På samma sätt som det finns faktorer som motverkar spridning av radioaktiva ämnen på stora djup finns flera faktorer som kan främja en spridning.

4.2.1 Förekomsten av större sprickzoner

Sprickzoner av olika dignitet förekommer allmänt i jordskorpan övre skikt. Senare års forskning har även påvisat sprickzoner på stora djup och dessutom att större zoner kan ha ett rörligt grundvatten, exempelvis har man påvisat grundvattenmobilitet i mycket djupa sprickzoner på Kolahalvön (Popov et al. 1999).

Av säkerhetsskäl bör därför alla områden med öppna sprickzoner väljas bort även om risken för spridning till biosfären blir mindre ju längre ned avfallet placeras. Det beror på att alla grundvattenrörelser på 3-5 km djup begränsas i vertikalled genom grundvattnets mer stabila densitetsskiktning jämfört med nivåer högre upp i berggrunden. Långväga vertikala transporter av radioaktiva ämnen från ett slutförvar på 3-5 km djup anses därför inte möjliga utan ett tillskott av energi av något slag. Det medför att LT-förvar ska dimensioneras så att man minimerar kärnavfallens värmepåverkan på omgivande berg, se avsnitt 4.2.2.

4.2.2 Uppvärmningen av berget runt avfallsbehållarna

Värmepåverkan i närområdet kan ej undvikas helt på grund av avfallens radioaktiva sönderfall med värmebildning som följd. Vidare står klart att denna värmebildning blir så långvarig (tusentals år) att den skulle kunna orsaka värmerelaterade grundvattenrörelser i berggrunden, vilket i sin tur skulle främja transport uppåt av eventuellt utläckande radioaktivitet.

Avgörande vid LT-förvar är därför att avfallsbehållarna placeras så glest i förvarsområdet att bergets värmepåverkan begränsas. Gör man det, påverkas bara berget och grundvattnets densitetsskiktning inom ett begränsat när-område. Vidare förutsätts att buffertzonen mellan deponin och den ”övre zonen” med rörligt grundvatten har gjorts tillräckligt bred, se avsnitt 3.1.

För ett svenskt LT-förvar anses inte denna värmebildning och uppvärmning runt förvaret innebära några större problem då det finns flera sätt att minimera värmeeffekten på omgivande berg. Först och främst minskas avfallens totala värmebildning genom den så kallade mellanlagringen av avfallet som nu sker under 15-50 år i CLAB utanför Oskarshamn. Sen finns flera sätt att balansera värmebildningen mot bergets konduktivitet (förmågan att leda bort värmen från deponiområdet). Dels genom att inte packa det mest radioaktiva avfallet för tätt i behållarna och dels genom att använda avståndsbuffertar i borrhålen mellan behållarna. Vidare kan man placera borrhålen så glest att värmeeffekten begränsas i hela förvarsområdet. Dock finns en målkonflikt då en glesare packning av avfallsbehållarna medför fler borrhål och därmed högre borkostnader.

Vid HT-förvar vill man uppnå en så stor värmepåverkan (ca 800 °C) att berget närmast förvaret genomgår en partiell uppsmältning, vilket – efter att värmen avletts genom bergets värmeledningsförmåga – skulle ”placera” förvaret mitt inne i en zon med nykristalliserat berg som är torrt och gasfritt och som utåt omges av flera skyddande zoner, se figur 3. Alla HT-förvar förutsätter således att avfallsbehållarna placeras så tätt i deponiområdet att den önskade värmeeffekten uppnås.

4.2.3 Borrhålens förslutning

Konceptet djupa borrhål förutsätter breda borrhål för deponeringen liksom smala borrhål för mätningar av bergets och grundvattnets egenskaper. Alla borrhål medför risker eftersom de skulle kunna fungera som transportkanaler uppåt mot biosfären för grundvatten eller gaser med radioaktiva ämnen.

Avgörande är förstas hur väl borrhålen kan tätas efter deponeringen. Idag anses det finnas flera tillförlitliga metoder, vilket gör att denna fråga inte längre bedöms hindra en slutförvaring i djupa borrhål (SKB R-00-35, sid 32). Vidare motverkar grundvattnets densitetsskiktning långväga transport i vertikalled,

vilket gör att utläckande radioaktiva ämnen ändå inte skulle kunna föras särskilt långt upp. Avgörande är då att man har dimensionerat avfallsdeponin så att värmen från det radioaktiva sönderfallet inte tillför grundvattnet utanför själva deponiområdet så mycket energi att det skulle medge migration uppåt. Även i detta avseende fungerar således grundvattnets densitetsskiktning och en väl dimensionerad buffertzon (se avsnitt 3.1) som viktiga säkerhetshöjande faktorer.

För gasformiga ämnen fordras mer detaljerade studier även om olje- och gasindustrin sen länge har väl fungerande metoder för att ”gastäta” alla typer av borrhål. Dessa metoder kan dock inte utan vidare appliceras på borrhålen i ett slutförvar eftersom sådana borrhål dels ska börja tätas på stora djup (ca 3 km och uppåt) och dels att dessa tätningar ska fungera under tusentals år.

4.2.4 Biokemisk påverkan på förvaret

Senare års forskning har påvisat biologiskt liv långt nere i berggrunden och att denna bakteriella aktivitet kan påverka den geokemiska miljön så länge temperaturen inte överstiger de ca 115 °C som anses vara övre gränsen för dessa djuplevande bakterier (Pedersen 2001; Sand 2003). Därmed finns viss potential för bakteriell påverkan på ett slutförvar i djupa borrhål då temperaturen på 3-5 km djup normalt ej överstiger 105 °C i äldre kontinental berggrund av den typ som dominerar i Sverige (SKB TR-98-05, sid 63-64; SKB R-04-09, sid 21). Värmebildningen genom avfallets radioaktiva sönderfall gör dock att dessa djuplevande bakteriers temperaturgräns överskrids relativt snart efter att borrhålen förslutits, vilket medför att deponin då skulle omges av en zon som är fri från biologisk aktivitet.

På basis av nu tillgängliga data anses all biologisk påverkan bli begränsad; exempelvis anses den inte utgöra något större problem i SKBs senaste studie (SKB R-04-09, sid 25). Dock förutsätts att man väljer material så att den bakteriella aktiviteten inte ändrar grundvattnets reducerande (icke-oxiderande) miljö kring förvarsområdet.

4.2.5 Förändringar i samband med kommande istider

Problematiken kring framtida nedisningar är komplex för alla former av slutförvar i berggrunden. Dels finns mer direkta risker; exempelvis att det sker jordskalv med förkastningsrelaterade rörelser i berggrunden till följd av de tryckändringar som uppstår i samband med en landis utbredning eller avsmältning (t.ex SKB TR-05-04). Dels finns mer indirekta risker i form av hydrogeologiska förändringar i berggrunden till följd av ändringar i klimat eller i grundvattnets infiltration och strömningsmönster (t.ex SKB TR-99-05). Bland annat kan grundvattnets strömningsmönster påverkas av permafrostens utbredning eller att tidigare etablerade infiltrationsområden blir istäckta. Vidare kan sådana faktorer förändra det hydrostatiska trycket i tidigare utströmningsområden. Exempelvis skulle en av permafrosten, eller landisen, minskad infiltration (eller utströmning) kunna medföra att gränsen mellan ytnära och tyngre grundvatten flyttas i vertikalled (pers. komm. Herbert Henkel 2005).

Då sannolikheten är stor att det inträffar en åtminstone partiell nedisning av Skandinavien före avfallens radioaktivitet har avklingat, medför istidsscenarioet risker för alla typer av slutförvar inom Sverige. Existerande data medger ingen inträngande analys av dessa risker utöver att de minskar ju djupare avfallet placeras i berggrunden. I synnerhet behövs mer precisa data för att säkra att slutförvaret ej placeras nära utströmningsområden, eller nära områden som vid en framtida nedisning kan bli nya utströmningsområden (Voss & Provost 2001).

5. Förutsättningar för slutförvar i djupa borrhål

Förutsättningarna för att etablera ett LT-förvar i djupa borrhål rymmer geologiska, hydrogeologiska, tekniska och ekonomiska/politiska faktorer. Med stöd av senare års forskningsresultat har jag sammanfattat de mest avgörande faktorerna i 9 punkter:

- 1) att det under 15-30 år finns en politisk och social acceptans för ett genomförande och de kostnader som krävs under projektets gång,
- 2) att det finns ett tillräckligt stort område på 3-5 km djup med stabilt densitetsskiktat grundvatten,
- 3) att det finns mät- och analysteknik för borrhålmätningar som kan lokalisera områden på 3-5 km djup med ett stabilt densitetsskiktat grundvatten,
- 4) att det finns geodynamisk och hydrogeologisk kunskap så att man kan lokalisera områden på 3-5 km djup där effekterna av framtida istider inte äventyrar förvarets långtida säkerhet,
- 5) att det finns teknik för den precisionsborrning som behövs av både smala borrhål för sondering och breda borrhål för deponering,
- 6) att det finns teknik som medger en säker deponering av avfallsbehållarna och att man under deponifasen kan ta upp behållare för byte eller tester av material och teknik,
- 7) att borrning, deponering av avfallsbehållarna liksom förslutning av samtliga borrhål kan ske utan att grundvattnets densitetsskiktning långsiktigt störs utan för själva förvarsområdet,
- 8) att kärnavfallet kan långtidsförvaras på 3-5 km djup utan att värme- och strålningseffekter från avfallens radioaktiva sönderfall stör grundvattnets densitetsskiktning utanför själva förvarsområdet,
- 9) att såväl borrustrustning, avfallsbehållare som borrhålsförseglingsmaterial väljs så att det inte främjar kemiska reaktioner som medför gasbildning i förvarsområdet.

Förutsättningarna för ett HT-förvar är snarlika vad gäller borrhåsteknik, deponering och förslutning av borrhålen. Däremot tycks bergets hydrogeologiska aspekter vara mindre avgörande eftersom huvudvillkoret är att finna ett stort område med lämplig värdbergart så att man uppnår avsedd uppsmältning och skyddszonering runt avfallsdeponin, se avsnitt 3.2.

6. Kan dessa förutsättningar infrias?

Att korrekt bedöma riskerna med ett slutförvar på stora djup är ännu ogörligt eftersom det krävs mer detaljerade data. Däremot kan man använda de funktionsvillkor som har ställts på ett svenskt slutförvar för riskanalyser och jämförelser mellan olika typer av slutförvar. Exempelvis kan man jämföra risker och förutsättningar för ett KBS-förvar på ca 500 m djup med de för ett slutförvar i djupa borrhål på 3-5 km djup. Men varje sådan jämförelse förutsätter också etiskt grundade avvägningar mellan de delvis motstridiga funktionsvillkor som nu finns. Exempelvis måste man värdera och balansera de delvis motstridiga kraven på avfallens oåtkomlighet respektive återtagbarhet. Likaså om dessa faktorer ska kunna ändras över tid.

Sådana etiskt grundade avvägningar ligger utanför denna i huvudsak berggrundsrelaterade studie. Granskningen har därför begränsats till frågan om de 9 angivna förutsättningarna för ett slutförvar i djupa borrhål kan anses vara infriade eller ej. Dessutom har jag begränsat granskningen till LT-förvar då det fortfarande saknas referensmaterial för att kunna bedöma HT-konceptet på lika villkor.

1) Hur stor blir kostnaden?

Tidigare invändningar mot förvar i djupa borrhål gällde bland annat borrhållskostnaden (SKB R-00-28). Men i den senast offentliggjorda kostnadsberäkningen för en deponering på 2-4 km djup anges ca 40 miljoner kronor per deponihål (SKB R-00-35), vilket med kalkylerade 20-40 borrhål och inflationsuppräkningsger en borrhållskostnad under 2 miljarder kronor. Med uppräkningsger för ökade borrhållskostnaderna vid en djupare deponering (3-5 km) torde kostnaden för deponeringshålen vara i storleksordningen 3-4 miljarder kronor. Därtill kommer kostnaden för sonderande borrhål, vilket torde höja den samlade borrhållskostnaden till 5-6 miljarder. Vidare tillkommer konceptets utvecklingskostnader – av SKB tidigare angivet till minst 4 miljarder kronor (SKB R-00-28, sid 9) – samt kostnader för deponering och förslutning.

Tillförlitligheten i dessa mycket översiktliga bedömningar måste självfallet prövas. Till dess kan bara konstateras att kostnaderna för en kärnavfallsdeponi i djupa borrhål knappast överstiger de ca 16 miljarder som SKB anger för att etablera ett yttnära slutförvar av KBS-3-typ på ca 500 m djup. Ett KBS-förvar har dessutom högre kostnader för både inkapsling och framtida övervakning.

En översiktlig kostnadsbedömning finns även i den amerikanska studien "The Future of Nuclear Power" (MIT 2003), även om man där främst lyfter fram borrhålskonceptets förväntade säkerhets fördelar och platsvalsflexibilitet.

Mot denna bakgrund synes varken anläggningskostnader eller driftskostnader tala emot konceptet djupa borrhål, särskilt som konceptets långsiktiga övervakningskostnader bedöms vara mycket lägre än för alla typer av mer ytnära slutförvar. Istället finns kanske skäl att uppmärksamma risken att HT-förvar, trots sina konceptuella oklarheter, skulle kunna förordas som ett än billigare alternativ med tanke på ett HT-förvars låga anläggningskostnader jämfört med både LT-förvar och slutförvar av KBS-typ.

2) Finns det områden på 3-5 km djup med stabilt densitetsskiktat grundvatten?

Först kan konstateras att redan existerande mät- och analysteknik räcker för att klarlägga om det finns ett stabilt densitetsskiktat grundvatten på dessa djup. Det framgår bl.a av forskningsprogrammen kring de djupa borrhålen i södra Tyskland, se exempelvis redovisningen i SKB R-04-09. För att sedan fastställa om ett visst område är stort nog, krävs mätdata från flera sonderande borrhål inom området.

Med stöd av nu tillgängliga djupdata förväntas grundvattnet på 3-5 km djup vara stabilt densitetsskiktat i nära nog all kontinental berggrund med den relativt flacka urbergskaraktär som dominerar Sverige utanför fjällkedjan. Andra undantag kan vara områden nära större sprickzoner, bl. a. har man påvisat grundvattenmobilitet i anslutning till djupa sprickzoner i borrhål på Kolahalvön (SKB R-04-09).

En tredje riskfaktor att uppmärksamma är förekomsten av diabasgångar vars kontakter mot omgivande berg inte är geokemiskt stabila (metamorft omvandlade). Då de flesta unga diabasgångar dessutom är brantstående och djupgående, utgör de potentiella försvagningsplan i berggrunden som kan vara lättaktiverade redan vid relativt små störningar. I områden med unga, icke-metomorfa diabasgångar ökar därför risken för djupgående grundvattenrörelser. Koncentrationer av diabasgångar av denna typ finns i flera områden, bl.a i Skåne, Göteborgs-regionen och i stråk från Blekinge upp mot Dalarna. Att denna riskfaktor ännu inte uppmärksamats inom det svenska kärnavfalls-programmet är besynnerligt, särskilt som läckage från slutförvar på 500 m djup skulle ske inom den övre zon i berggrunden där det finns ett rörligt grundvatten som, utöver bergets normala spricksystem, också skulle kunna spridas uppåt via denna typ av brantstående försvagningsplan.

Hur stora områden i Sverige som har ett stabilt densitetsskiktat grundvatten på 3-5 km djup är oklart då det än så länge bara finns data från ett fåtal borrhål i Europa. Men då dessa data representerar geologiskt komplexa områden, finns inget som tyder på att grundvattnets densitetsskiktning skulle vara mindre

utvecklad i normal svensk berggrund på 3-5 km djup när man undantar områden med större deformationszoner, unga diabasgångar och i fjällkedjans närhet. Fast hur det verkligen förhåller sig, kan bara fastställas med hjälp av mätprogram i sonderande borrhål till aktuella djup.

Översiktliga karakteriseringar för att klarlägga var gränsen går mellan ytnära och tyngre grundvatten bör däremot kunna ske med hjälp av geofysiska mätmetoder i markplanet. Därefter behövs dock mätningar i sonderande borrhål för att fastställa hur stabil densitetsskiktningen är. Ett förvar i djupa borrhål förutsätter således ett relativt omfattande mätprogram för att klarlägga om ett område har stabil grundvattensskiktning på 3-5 km djup.

Under senare år har Sveriges Geologiska Undersökning (SGU) gjort regionala sammanställningar av såväl berggrund som deformationszoner och därmed finns underlag för att börja välja ut lämpliga sökområden. Tillräckligt stora områden med relativt homogen berggrund och utan unga diabasgångar torde finnas i många delar av landet.

3) Finns den analysteknik som behövs för mätningar i djupa borrhål?

Mätteknik anpassad till djupa borrhål behövs i flera skeden. För att bedöma ett områdes bergtekniska och hydrologiska förutsättningar behövs mätningar av flera parametrar nere i sonderande borrhål (som av kostnadsskäl är förhållandevis smala). Vidare behövs teknik för att styra borrhållningen i önskad riktning och för att, under och efter deponifasen, kontrollera hur förvaret fungerar.

Även inom detta fält rapporteras en förhållandevis snabb teknikutveckling i och med de stora forskningsprogram som genomförts i Tyskland, Ryssland och Nordamerika under senare år (SKB R-00-35). Publicerade mätdata tyder på att det både finns instrumentering och utvärderingskapacitet för att klara de uppgifter som krävs. Rimligen sker också en fortsatt teknikutveckling när väl mätbehoven preciseras.

Den metodologiskt mest kritiska uppgiften torde vara att man vid drivningen av sonderande borrhål inte agerar så att man riskerar kontaminera det grundvatten man ska analysera allteftersom borrhållningen når djupare nivåer. Med modern ”tracer-teknik”, t.ex. att isotopmärka den borrhållsvätska man använder, kan man säkra tillförlitligheten i de mätserier som behöver göras nere i borrhålen och även mellan olika nivåer. Av Harrisons konsultrapport (SKB R-00-35) framgår vikten av förtänksamhet inför varje val av borrhållsteknik och analysutrustning så att man inte tvingas göra nya sonderande borrhål för att säkra tillförlitliga mätresultat.

4) Finns den geodynamiska och hydrogeologiska kunskap som behövs för att lokalisera områden på 3-5 km djup där effekterna av framtida istider inte äventyrar förvarets långtida säkerhet?

Då istidsproblematiken endast berörts summariskt i senare års redovisningar (SKB R-00-28; SKB R-04-09), eller via översiktliga modelleringar (SKB TR-99-05, TR-04-25, TR-05-04), kvarstår viss osäkerhet kring förvarets långtida säkerhet även

om sannolikheten för direkta effekter är mycket liten på så stora djup som 3-5 km. Däremot kan indirekta effekter tänkas påverka säkerheten, exempelvis genom att grundvattnets strömningsmönster ändras så att gränsen mellan ytnära och tyngre grundvatten flyttas i vertikalled.

Efter konsultationer med sakkunniga inom hydrogeologi och geodynamik är det författarens bedömning att det behövs mer precisa studier för att man ska kunna värdera olika riskscenarier. Mot det kan anföras att borrhålsdata från bl.a Laxemar i östra Småland visar att det där finns en tydlig densitetsskiktning (SKB TR-01-11, sid 143-150) och att grundvattnet under 1,1-km-nivån synbarligen inte påverkats alls av de upprepade nedisningar som skett under senaste miljonen år (SKB TR-98-05, sid 92). Dock återstår att klarlägga hur regionalt giltiga sådana lokala mätdata är.

Istidsproblematiken kan sägas medföra att valet av deponeringsdjup måste grundas på konservativa bedömningar så länge det råder minsta osäkerhet om hur djupt ner i berggrunden som istidseffekter kan nå. Bland annat bör man visa att inte något istidsscenario skulle medföra så omfattande vertikala ändringar av grundvattnets strömningsmönster (se exempel i avsnitt 4.2) att den övre zonens rörliga grundvatten når så djupt att det påverkar förvarsområdets grundvattensskiktning.

Sammantaget medför istidsproblematiken att det behövs en tillräckligt bred ”hydrologisk buffertzona” mellan avfallsdeponin och berget ovanför med rörligt grundvatten (se avsnitt 3.1). Vidare står klart att det behövs mer ingående analyser av olika istidsscenarier för att avgöra om en borrhålsdeponi kan förlängas så högt upp i berggrunden (2-4 km) som SKB angivit i sina översiktliga bedömningar (SKB R-00-28).

5) Finns teknik för precisionsborrning av tillräckligt breda borrhål för deponering och smala borrhål för sonderande mätningar?

Dessa borrhålsfrågor är helt avgörande för konceptet djupa borrhål och för några år sedan gjordes en engelskspråkig konsultrapport (SKB R-00-35) av Tim Harrison, Deutag/Well Engineering Partners BV. I denna skärskådas olika borrhåls tekniker i ljuset av senare års framsteg. Granskningen leder fram till slutsatsen att det inte längre finns några tekniska hinder att borra så breda borrhål som behövs för deponering av kärnavfallsbehållare i djupa borrhål (abstract sid 3):

“It is the author’s conclusion that it is possible to drill the well with currently existing technology, although it represents one of the biggest challenges to be presented to the drilling industry.”

[Författaren (Harrison, övrs. anm.) bedömer det möjligt att borra deponeringshål med dagens teknik även om arbetet utgör en av de största utmaningarna för borrhålsindustrin.]

Rapportens slutsatser tycks väl underbyggda, vilket knappast förvånar med tanke på Harrisons bakgrund som delansvarig i de borrhållsprogram som nådde dryga 9 km djup i södra Tyskland. Exempelvis upptäcker Harrison att man kan reducera kostnaden per borrhål med 180,000 euro bara genom att modifiera några dimensioner i den borrhållsplan SKB angivit (sid 45).

Inte heller i den stora amerikanska utvärderingen (MIT, 2003) påtalas några tekniska problem att genomföra de borrhållsprogram som behövs för förvar i djupa borrhåll.

Teknik att precisionsstyra borrhåll finns redan hos alla större borrhållsoperatörer (SKB R-00-35). Bland annat anses det numera möjligt att precisionsborra ett så kallat "fanned array" (Chapman & Gibb 2003), se figur 2.

6) Finns teknik för en säker deponering av avfallsbehållarna och att åter ta upp behållare för tester eller byte under deponeringsfasen?

Teknik för deponering och återtagande av behållare i borrhåll beskrivs också i Harrisons konsultrapport (SKB R-00-35, avsnitt 4 och 5). Granskningen sammanfattas i konstaterandet att det redan finns beprövad teknik för detta även om det krävs grövre dimensioner på viss utrustning jämfört med den som utvecklats för oljebolagens verksamhet (se sammanfattningar på sid 41 och 44). Modifieringar kan även behövas för att säkra ett återtagande av behållare där fästmekanismen skadats, etc. Harrison påpekar också att man, för att säkra återtagbarheten av behållare under deponeringsfasen, kan behöva se över den metodik och de materialval som SKB angett för att fixera behållarna på rätt plats i borrhålet (sid 43-44).

Även riskerna i samband med deponering respektive återtagande av behållare, behöver klarläggas bättre. Några riskmoment tycks kunna bemästras med tekniken att pressa ner den aktuella behållaren och därefter försluta borrhålet för att sedan fortsätta deponeringen i ett nytt borrhål. Sådana om-disponeringar skulle dock öka borrhållskostnaden med åtskilliga miljoner och kanske går det att utveckla bättre alternativ.

Återtagande av avfallsbehållare efter slutlig förslutning av borrhållen rymms knappast inom konceptet djupa borrhåll. Det beror på att konceptet bygger på att avfallet ska slutförvaras så fysiskt avskilt att det aldrig finns skäl att återta något avfall. Ett sådant resonemang förutsätter dock att man kan lokalisera och placera förvaret i ett område med stabilt densitetsskiktat grundvatten så att man härigenom kan trygga avfallets långtida säkerhet.

7) Finns teknik för borrhåll, deponering av avfallsbehållarna och förslutning av samtliga borrhåll så att det kan ske utan att grundvattnets densitetsskiktning störs utanför själva förvarsområdet?

Dessa aspekter redovisas också i Harrisons konsultrapport (SKB R-00-35). Även om Harrison inte tycks se några större problem inom detta fält (avsnitt 3, 4 och 5), behövs mer detaljerade studier för att tekniskt optimera metodiken så att existerande

målkonflikter mellan kostnader och materialval inte äventyrar förvarets långtida säkerhet. Bland annat återstår att precisera hur man ska genomföra de borrhningar och borrhålmätningar som behövs före och under själva deponeringsfasen.

8) Kan kärnavfallet långtidsförvaras på 3-5 km djup så att värme- och strålningseffekter från avfallens radioaktiva sönderfall inte stör grundvattnets densitetsskiktning utanför själva förvarsområdet?

För LT-förvar av normalt svenskt kärnavfall anses denna omgivningspåverkan inte vara något större problem (SKB R-00-28). Dels kan avfallens värmekapacitet minskas till mer hanterliga nivåer under de 15-50 år som avfallet ”mellanlagras” i CLAB utanför Oskarshamn och dels finns fler sätt att styra värmeeffekten på omgivande berg. Bland annat kan borrhålen placeras så glest att värmeeffekten utanför förvarsområdet blir ringa. Vidare kan värme-bildningen över tid balanseras mot bergets konduktivitet (förmågan att avleda värme) genom val av lämpliga värdbergarter och genom att placera avståndsbuffertar mellan avfallsbehållarna i borrhålen, se figur 1. Sådana buffertar måste vara långtidsbeständiga så att behållarna behåller sina inbördes avstånd i deponihålen. Även här finns dock en målkonflikt då en glesare packning av avfallsbehållarna ger lägre värmepåverkan men högre borrhkostnader.

Sammantaget förväntas inga större tekniska problem med dessa aspekter, se exempelvis SKB R-00-28 där man redovisar hur ett svenskt LT-förvar skulle kunna utformas. Dock behövs preciseringar i flera avseenden, bl.a vad gäller storleken på behållare, val av buffertmaterial och hur glest avfallsbehållarna ska placeras i förvarsområdet.

9) Finns det borrhutrustning och material till avfallsbehållare och borrhålsförsegling så att man kan undvika en framtida gasbildning inom förvarsområdet?

Även dessa aspekter behöver klarläggas bättre. Några egentliga betänkligheter redovisas ej i SKB R-00-28, utöver att undvika material som vid korrosion ger vätgas (sid 65). Likaså bör man undvika alla material med potential att påverka förvarsområdets syrefria miljö då den bidrar till långtidssäkerheten genom att hämma transport av långlivade radionukleider som teknetium-99 och neptunium-237 (MIT 2003, sid 56).

7. Konceptet djupa borrhål - en samlad bedömning

Utöver viss osäkerhet rörande risker i samband med framtida istider (se punkt 4 i avsnitt 6) och materialval vid borrhning och förslutning av borrhålen (se punkt 7 i avsnitt 6), återstår att klarlägga om det verkligen finns ett grundvatten på 3-5 km djup i svensk berggrund som är stabilt densitetsskiktat, dvs om djupaborrhålskonceptets hydrogeologiska grundförutsättning kan infrias inom landet. Med nu tillgängliga data för äldre, kontinental berggrund av den typ som dominerar i Sverige tycks denna förutsättning snarare vara regel än undantag, åtminstone när man väljer bort områden med större deformationszoner, unga diabasgångar och i fjällkedjans närhet. Men hur det egentligen förhåller sig kan bara klarläggas med nya borrhålmätningar på aktuella djup. Att sådana borrhningar och analyser kan genomföras med nu tillgänglig teknik, står dock klart.

Hittills har man inte genomfört några systematiska hydrogeologiska studier på större djup någonstans i Sverige. Det kan tyckas märkligt, särskilt som både Statens strålskyddsinstitut (SSI) och Statens kärnkraftinspektion (SKI) länge förordat Forsknings- och Utvecklingsprogram (FoU) för att bättre klarlägga förutsättningarna för ett svensk slutförvar i djupa borrhål. Frågan har även tagits upp av regeringen och senast i samband med granskningen av SKBs forskningsprogram Fud-04:

”SKI och SSI pekar i sina yttranden på att SKB bör förtydliga redovisningen av alternativa metoder inför miljöbalksprövningen. En jämförelse med KBS-3-metoden bör göras som bl.a. utnyttjar säkerhetsanalytisk metodik. Regeringen gör samma bedömning.”

SKBs bristande intresse för konceptet djupa borrhål, senast manifesterat i Fud-04, sid 319, är att beklaga. Ointresset har dock medfört att det nu finns praktiska erfarenheter från flera andra länder att ta del av, t.ex vilka mätprogram som kan användas för att klarlägga om grundvattnet är stabilt skiktat eller ej. Likaså finns mät- och analysteknik som redan har testats i djupa borrhål. Allt detta underlättar för svenska FoU-insatser.

Huruvida man även kan använda några tidigare anlagda borrhål inom landet för tillförlitliga mätningar av densitetsskiktning m.m, framgår ej av redovisade data. Problemet är att såväl grundvatten som omgivande berg kan ha förorenats, då dessa borrhål anlagts för helt andra ändamål. Saken torde ändå vara värd att undersöka med tanke på kostnaden för nya borrhål till aktuella djup. Likaså bör man undersöka möjligheten att använda särskilt djupa hiss-schakt vid nedlagda gruvor för att därifrån anlägga sonderande borrhål till de djup som behövs för denna typ av hydrogeologisk forskning.

När det gäller teknikfrågorna, tycks det efter Harrisons konsultrapport (SKB R-00-35) inte längre föreligga några kända teknikrelaterade hinder för etablering av slutförvar i djupa borrhål. Dels tycks flera förutsättningar redan vara infriade (se punkt 3, 5 och 8 i avsnitt 6) och dels bedöms övriga teknikrelaterade

förutsättningar kunna infrias med traditionella FoU-insatser (se punkt 6, 7 och 9 i avsnitt 6). Mer detaljerade data behövs dock för att verifiera Harrisons i grunden positiva bedömning av borrhåsteknikfrågorna. Den främsta utmaningen torde vara att utveckla deponeringstekniken då det här handlar om kilometerlånga deponeringsavstånd och relativt tunga behållare. Harrison, med egna erfarenheter av tillämpad djupborrning, tycks se med stor tillförsikt även på denna utmaning trots bedömningen att det här handlar om ”one of the biggest challenges to be presented to the drilling industry”.

Avslutningsvis; när det gäller anläggningskostnaderna för ett svenskt slutförvar i djupa borrhål, tycks dessa rimliga jämfört med kostnaden för ett KBS-förvar i gruvgångsliknande tunnlar på ca 500 m djup (se punkt 1, sid 18). Även utvecklingskostnaderna tycks hanterliga jämfört med de för KBS-metoden, särskilt som konceptets basala inslag grundas på redan existerande borrhå- och analysteknik. Vidare kan en del av KBS-programmets utvecklings-arbete också användas inom konceptet djupa borrhål om än med vissa modifieringar; gäller bl.a logistik, avfallsbehållare och säkerhetsanalyser.

Betydelsefullt för konceptet djupa borrhål är också att övervaknings- och övriga ”safeguard”-kostnader för ett slutförvar i djupa borrhål blir mycket lägre jämfört med de slutförvaringsmetoder som medger ett framtida återtagande av kärnavfallsbehållare (Swahn 1996; Peterson 1999). Det beror på att varje form av återtagbarhet förutsätter en viss tillgänglighet, vilket medför stora ”safeguard-kostnader” för den långtida bevakning som då krävs för att säkra att kärnavfallet inte kommer i orätta händer.

Sammanfattningsvis visar denna granskning att ny kunskap och landvinningar inom hydrogeologi och borrhåsteknik har ökat möjligheten att använda djupa borrhål för en slutförvaring av det svenska kärnavfallet. Avgörande är att slutförvaret kan placeras i stabil berggrund på nivåer där grundvattnet saknar kontakt med biosfären och att deponering och förslutning kan ske utan att grundvattnets densitetsskiktning långsiktigt störs utanför deponiområdet.

En fördel, jämfört med ett ytnära slutförvar av KBS-3-typ som nu förbereds i Sverige, är att ett borrhålsförvar har förutsättningar att bli mer teknologiskt robust. Det beror på att konceptet djupa borrhål tycks tillåta en så djup deponering av kärnavfallet att hela deponiområdet skulle omges av ett stabilt densitetsskiktat grundvatten utan kontakt med marknära nivåer medan ett KBS-3-förvar skulle omges av ett rörligt grundvatten i kontakt med marknära nivåer. Denna hydrogeologiska skillnad har stor betydelse för säkerheten, vilket blir särskilt tydligt i scenarier med utläckage av radioaktiva ämnen. Ett borrhålsförvar på 3-5 km djup kan därför mindre sårbart för såväl förväntade händelser (t.ex ändrade grundvattenförhållanden under kommande istider) som oönskade händelser (t.ex terroristaktioner, teknologiska missgrepp

eller större jordskalv i förvarsområdet). Avgörande är dock att avfallet kan deponeras på avsett djup i borrhålen utan haverier, vilket förutsätter ny forskning liksom fortsatt teknikutveckling.

SKBs bristande intresse för konceptet djupa borrhål kan möjligen bero på att man satsat så hårt på att utveckla sitt egna koncept ända sedan KBS-metoden först presenterades på 1970-talet. Skulle ointresset bestå, återstår bara för ansvariga myndigheter, Statens kärnkraftinspektion (SKI) och Statens strålskyddsinstitut (SSI), att finna en annan huvudman som kan ta över uppgiften att klarlägga om djupaborrhålskonceptets hydrogeologiska grundförutsättning kan infrias inom landet. Med andra ord; att klarlägga om det verkligen finns ett grundvatten på 3-5 km djup i svensk berggrund som är tillräckligt stabilt densitetsskiktat. En möjlig huvudman för denna FoU-uppgift kan vara den geologiska sektorsmyndigheten Sveriges geologiska undersökning (SGU).

8. Referenser

Attrill, P.G. & Gibb, F.G.F. 2003a. Partial melting and recrystallization of granite and their application to deep disposal of radioactive waste: Part 1 – Rationale and partial melting. *Lithos* 67, 103-117.

Attrill, P.G. & Gibb, F.G.F. 2003b. Partial melting and recrystallization of granite and their application to deep disposal of radioactive waste: Part 2 – Recrystallization. *Lithos* 67, 119-133.

Chapman, N. & Gibb, F.G.F. 2003. A truly final waste management solution: Is very deep borehole disposal a realistic option for high-level waste or fissile materials? *Radwaste Solutions* 10, 26-37.

Gibb, F.G.F., 1999. High-temperature, very deep, geological disposal: a safer alternative for high-level radioactive waste? *Waste Management* 19, 207-211.

Gibb, F.G.F., 2000. A new scheme for the very deep geological disposal of high-level radioactive waste. *Journal of Geological Soc. London* 157, 27-36.

Halsey et al., 1995. Disposition of Plutonium in Deep Boreholes, presentation vid NATO Advanced Research Workshop om Disposal of Weapons Plutonium: Approaches and Prospects, 14-17 maj, St Petersburg, Ryssland.

Henkel, Herbert, 2005. Avdelningen för mark och vattenteknik vid Kungliga Tekniska högskolan (KTH), Stockholm. Personlig kommunikation.

Juhlin et al., 1991. Scientific Summary Report of the Deep Gas Drilling Project in the Siljan Ring Impact Structure. Vattenfall, RD&D Report U(G) 1991/14.

MIT 2003; The Future of Nuclear Power -- an interdisciplinary MIT study, 161 sidor. Massachusetts Institute of Technology, ISBN 0-615-12420-8.

Möller et al., 1997. Palaeofluids and recent fluids in the upper continental crust: Results from the German Continental Deep Drilling Program (KTB). *J. Geophys. Res.* 102, B8, 18233-18254.

Pedersen, K., 2001. Diversity and activity of microorganisms in deep igneous aquifers of the Fennoscandian Shield. IN: J-K. Fredrickson and M. Fletcher (eds), *Subsurface Microbiology and Biochemistry*. Wiley-Liss Inc., New York, sid 97-139.

Peterson, P.F., 1999. Issues for Detecting Undeclared Post-Closure Excavation at Geologic Repositories, *Science & Global Security*, Volume 8, pp. 1-39.

Popov et al., 1999. New geothermal data from the Kola superdeep well SG-3. *Tectonophysics* 306, 345-366.

Sand, W., 2003. Microbial life in geothermal waters. *Geothermics* 32, 645-667.

Swahn, J., 1996. Retrieval and Safeguards Concerns Regarding Plutonium in Geological Repositories. In Merz, E. ed., *Disposal of Weapons Plutonium: Approaches and Perspectives*, Kluwer. pp 9-22.

Voss, C. & Provost, A., 2001. Recharge-area Nuclear Waste Repository in Southeastern Sweden. Demonstration of Hydrogeologic Siting Concepts and Techniques. SKI Report 01:44.

SKB Fud-program 2004. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall, inklusive samhällsforskning, 412 sidor.

SKB R-00-28. 2000. Försvarsalternativet djupa borrhål. Sammanställd under ledning av Peter Wikberg, 82 sidor.

SKB R-00-35. 2000. Very deep borehole. Deutag's opinion on boring, canister emplacement and retrievability. Rapport av Tim Harrison, 67 sidor.

SKB R-04-09. 2004. Recent geoscientific information relating to deep crustal studies. Rapport av John Smellie, 32 sidor.

SKB TR-98-05. 1998. The Very Deep Hole Concept – Geoscientific appraisal of conditions at great depth. Rapport av Juhlin et al., 124 sidor.

SKB TR-99-05. 1999. Impact of long-term climate change on a deep geological repository for spent nuclear fuel. Rapport av Boulton et al., 117 sidor.

SKB TR-01-11. 2001. Project Deep Drilling KLX02 – Phase 2. Rapport av Lennart Ekman, 188 sidor.

SKB TR-05-04. 2005. Effects of deglaciation on the crustal stress field and implications for endglacial faulting: A parametric study of simple Earth and ice models. Rapport av Björn Lund, 68 sidor.

The background of the entire page is a close-up photograph of water ripples, showing a gradient from light blue at the top to a darker blue at the bottom. The ripples are fine and create a textured, shimmering effect.

mkg

Miljöorganisationernas
kärnavfallsgranskning

Box 7005, 402 31 Göteborg
Telefon: 031-711 00 92
Fax: 031-711 00 93
E-post: info@mkg.se

www.mkg.se