

# Djupa borrhål - ett alternativt slutförvar för använt kärnbränsle?

Självständigt arbete för Civilingenjörsprogrammet i  
Miljö- och Vattenteknik 15 hp

W-11-08/S-01

Beatrice Aulin, Elin Björkman, Linnéa Fredriksson, Emil  
Friberg, Frida Hammar, Anna-Emilia Joelsson, Anna Köllgren,  
Emelie Larsson, Emma Lindbjer & Lisa Söderberg

2011-05-26



UPPSALA  
UNIVERSITET

## REFERAT

Använt kärnbränsle måste omhändertas på ett säkert sätt för att inte skada omgivningen. Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, har ansvaret för hanteringen av det svenska kärnbränslet och har för ändamålet utvecklat en metod som kallas KBS-3. Åsikter om att alternativa metoder borde utredas mer har emellertid förts fram. Ett alternativ som diskuterats på senare tid är metoden djupa borrhål. Metoden innebär att placera bränslet i kapslar i mycket djupa borrhål i urberget. Tanken är att placera kapslar på ett djup av ungefär 3-5 km och stapla dem på varandra upp till ungefär 2 km under ytan och sedan försluta borrhålen. På detta sätt förhindras radionuklider att komma upp till biosfären under det tidsspannet som det använda kärnbränslet är radioaktivt och farligt för levande organismer.

Syftet med denna rapport är att sammanställa kunskapsläget om djupa borrhål och på så sätt undersöka om det är ett möjligt alternativ som slutförvar av använt kärnbränsle. Vid kunskapsluckor har experter kontaktats och intervjuats, vilket förklarar den stora mängden personliga kontakter i rapporten. Målet har varit att slutligen kunna svara på frågan:

Är djupa borrhål ett alternativ som slutförvar av använt kärnbränsle?

Rapporten behandlar tre stora ämnesområden: geologi, hydrogeologi och teknik. Djupare förkunskaper inom dessa områden behövs inte för att förstå rapporten, men det underlättar för läsaren att vara bekant med grundläggande vetenskap på områdena. Hydrologiavsnittet fokuserar på vattenströmmingar i berg och tar upp kemiska processer som sker i vattnet på 3-5 km djup. Geologidelen redogör för de geologiska förhållanden som råder på djupet och utreder närmare hur eventuella jordbävningar och istider kan påverka förvaret. Den tekniska delen utreder möjligheterna och problemen med bland annat borrhål och deponering vid genomförandet av djupa borrhål.

Utgående från Strålskyddsmyndighetens säkerhetsföreskrifter för ett slutförvar diskuteras om djupa borrhål är ett alternativ eller inte. Slutsatsen utgående från denna rapport är att djupa borrhål inte kan uteslutas som möjligt slutförvar av använt kärnbränsle.

**NYCKELORD:** Använt kärnbränsle, djupa borrhål, slutförvar, deponering, borrhåls teknik, saltsprång, temperaturgradient, jordskalv, kapsel, förslutning, istid, radionuklider, bergsspänningar, Sverige.

Framsida efter *Odysseus unbound: the search for homers Ithaca*, 2010.

## ABSTRACT

Spent nuclear fuel can create a hazardous environment for all living things unless it is disposed of in a secure manner. The body responsible for the handling of spent nuclear fuel in Sweden is Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, who have proposed that a geological repository called KBS-3 is built. However, arguments are being made that alternative methods have not been examined thoroughly enough. Currently, the only feasible alternative is considered to be deep borehole disposal. This method is based upon the placement of canisters containing spent nuclear fuel in 3-5 km deep boreholes in the bedrock. The depth of the holes and brine will then prevent harmful radionuclides from reaching the biosphere.

This report aims to give a summary of deep borehole disposal according to the current general scientific understanding of the subject area. Based on Swedish regulation, this report considers whether or not deep borehole disposal can be an alternative repository. Three main subjects are identified in the report; hydrology, geology and technology. No deeper understanding for these subjects is required, but basic scientific knowledge could be helpful for the reader.

The understanding of hydrological and geological processes at 3-5 km depth is very important for the ability to make accurate security analyses. Especially important to investigate is the water regime, chemical processes and fracture zones. The impact of future ice ages and related earthquakes are also significant. Questions concerning technology include the drilling of the holes, the design of the canisters and how to deploy them. Sealing and buffer are also important aspects.

The final conclusion, based on this report, is that deep borehole disposal today cannot be excluded as an alternative repository for spent nuclear fuel.

Keywords: Spent nuclear fuel, deep borehole, repository, brine, deployment, drilling, canister, earthquakes, sealing, ice age, stress, radionuclides, thermal gradient, Sweden.

## FÖRORD

Rapporten redogör för vårt kandidatarbete vid Uppsala universitet våren 2011. Vi utgör en grupp om 10 studenter som studerar till civilingenjörer i miljö- och vattenteknik. Arbetet motsvarar 15 högskolepoäng och har utförts från 21 mars till 1 juni år 2011.Handledare var Roger Herbert på Institutionen för Geovetenskaper och uppdragsgivare Karin Högdahl från Kärnavfallsrådet.

Kandidatarbetet är en litteraturstudie om djupa borrhål som möjligt slutförvar av använt kärnbränsle och ger en sammanställning av det aktuella kunskapsläget på området. Eventuella kunskapsluckor har utretts genom att intervjua insatta forskare och experter, därav det stora antalet personliga kontakter i rapporten.

Arbetet syftar inte till att ta ställning till ifall djupa borrhål är ett bra eller dåligt alternativ som slutförvar utan snarare att ge en sammanfattande bild av kunskapsläget samt redogöra för vilka områden som forskning behöver bedrivas.

Uppsala maj 2011

*Beatrice, Elin, Linnéa, Emil, Frida, Anna-Emilia, Anna, Emelie, Emma och Lisa.  
Civilingenjörstudenter i Miljö- och Vattenteknik.*

## Innehåll

1	INLEDNING.....	1
2	SYFTE OCH FRÅGESTÄLLNING .....	2
3	BAKGRUND .....	4
4	GEOLOGI.....	6
4.1	SVERIGES BERGGRUND .....	6
4.1.1	Geologiska modeller ner till 5 km djup.....	6
4.1.2	Krav på geologin vid slutförvar med djupa borrhål.....	7
4.1.3	Framtida kunskap om berggrunden .....	8
4.2	NATURLIG KÄRNREAKTOR I OKLO, GABON.....	8
4.3	TEMPERATUR.....	9
4.4	BERGSPÄNNINGAR.....	11
4.5	ISTIDER .....	13
4.5.1	Varför inträffar istider? .....	13
4.5.2	När kommer nästa istid inträffa? .....	14
4.5.3	Jordbävningar .....	16
4.5.4	Jordbävningar som resultat av inlandsisen .....	17
4.6	BAKTERIERS PÅVERKAN .....	18
5	HYDROGEOLOGI.....	20
5.1	NUKLIDTRANSPORT .....	20
5.1.1	Advektion .....	20
5.1.2	Diffusion .....	20
5.1.3	Sorption.....	20
5.1.4	Kolloidaltransport .....	21
5.2	GRUNDVATTENFLÖDE I BERGGRUND.....	21
5.2.1	Mekaniska energins inverkan på grundvattenflödet .....	21
5.2.2	In- och utströmningsområden.....	22
5.2.3	Djupförvar i in- och utströmningsområden .....	23
5.2.4	Sprickornas betydelse för flödet i berggrunden.....	24
5.2.5	Den termiska energins inverkan på grundvattenflödet.....	25
5.2.6	Beräkningar och modeller.....	25
5.3	KEMISK SAMMANSÄTTNING .....	26

5.3.1	Salthalt .....	26
5.3.2	pH.....	29
5.3.3	Gassammansättning .....	29
6	TEKNIK.....	30
6.1	BORRNING .....	30
6.1.1	Borrteknik.....	30
6.1.2	Fodring .....	32
6.1.3	Borriggar.....	33
6.1.4	Tidsåtgång för borrning.....	34
6.2	KAPSEL.....	34
6.2.1	Specifikationer och krav.....	35
6.2.2	Storlek och dimension av kapseln .....	35
6.2.3	Material.....	36
6.3	DEPONERING .....	39
6.3.1	Utrustning.....	39
6.3.2	Djupledspositionering.....	41
6.3.3	Tidsåtgång .....	42
6.3.4	Risker.....	42
6.4	ÅTERUPPTAG .....	43
6.5	BUFFERT .....	43
6.5.1	Bentonitlera som buffert .....	43
6.5.2	Alternativt buffertmaterial.....	45
6.5.3	Deponering av buffert.....	45
6.6	FÖRSLUTNING AV BORRHÅLET.....	45
7	DISKUSSION .....	48
7.1	SVAR PÅ FRÅGESTÄLLNINGAR.....	48
7.2	DISKUSSION AV KUNSKAPSLUCKOR.....	51
8	SLUTSATS.....	53
9	TACK .....	54
10	REFERENSER .....	55
10.1	PERSONLIG KONTAKT.....	55
10.2	KÄLLOR .....	55

# 1 INLEDNING

På uppdrag av Kärnavfallsrådet har denna sammanställning om djupa borrhål gjorts för att utreda om metoden skulle kunna vara ett alternativt slutförvar för använt kärnbränsle. KBS-3 är den metod som förespråkas av Svensk Kärnbränslehantering, SKB, och är det förslag som lämnats in för granskning till Miljödomstolen och Strålskyddsmyndigheten i mars 2011. Kärnavfallsrådet är ett rådgivande organ till Regeringen gällande beslut om slutförvar av använt kärnbränsle.

Att hitta ett slutförvar som ska vara säkert i 100 000 år är en ansenlig utmaning. Många alternativ har utretts där deponering i djupa borrhål är ett av dem. Konceptet bygger på att placera det använda kärnbränslet djupt ned i berggrunden på 3-5 km djup, där grundvattnet förväntas ha högre salthalt samt vara mer stillastående än längre upp i jordskorpan.

En stor del av forskningen som gjorts om djupa borrhål kommer från SKB. De bedriver i dagsläget ingen egen forskning inom området. Dock finns det andra forskare som förespråkar konceptet djupa borrhål i Sverige. På senare tid har andra länder som USA, Storbritannien och Kanada börjat intressera sig för djupa borrhål. Borde även Sverige ge djupa borrhål en andra chans?

## 2 SYFTE OCH FRÅGESTÄLLNING

Syftet med projektet är att redogöra för metoden djupa borrhål samt utreda det rådande kunskapsläget för metodens genomförande. Huvudfrågan är formulerad enligt följande:

Är djupa borrhål ett alternativ som slutförvar av använt kärnbränsle?

För att besvara denna fråga har nedanstående delfrågor utformats utifrån "Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om säkerhet vid slutförvar av använt kärnämne och kärnavfall" (SSMFS 2008:21):

- Vilken typ av underhåll krävs efter borrhålens förslutning?

Enligt lag ska ett slutförvar för använt kärnbränsle inte kräva något underhåll, därför är det viktigt att utreda om konceptet uppfyller ett sådant krav. Det är även av intresse att undersöka om det är möjligt att återta det använda kärnbränslet. Detta kan vara intressant då mycket energi fortfarande finns kvar i bränslet och kan anses vara en framtida resurs.

- Vilka barriärer är planerade att användas och hur kompletterar de varandra?

Utgående från Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter framgår att slutförvaret ska vara utformat som ett flerbarriärsystem. Det är därför av intresse att undersöka vilka barriärer som är aktuella, men kanske framförallt hur dessa påverkas av de förhållanden som råder på stora djup i den svenska berggrunden. Hur kommer materialen som bygger upp barriärerna att reagera på till exempel strålning, saltvattenhalt, flöden, mekanisk påverkan, bakteriella angrepp, höga temperaturer och tryck? Viktigt är även att analysera hur barriärerna fungerar gällande att förhindra spridning av radionuklider.

- Hur kommer djupa borrhål att påverkas av istider och jordbävningar?

Eftersom ett slutförvar måste vara beständigt under lång tid är det relevant att klarlägga vad som skulle kunna hända i området där förvaret placeras under den aktuella tidsrymden. Det är av vikt att ta reda på vilka geologiska förutsättningar som är fördelaktiga och hur sprickfrekvensen ser ut i området. Även plattetektonisk- och istidsrelaterad påverkan på ett slutförvar är av intresse. Kan till exempel en nedisning orsaka en större risk för jordbävningar?

- Hur lång tid räknas djupa borrhål kunna förhindra läckage av radioaktiva ämnen till omgivningen?

Det är radionukliderna som är skadliga för levande organismer och ett slutförvars huvuduppgift är att se till att dessa inte når biosfären där djur, växter och människor lever. Eftersom de flesta radionuklider kan vara farliga i 100 000 år är frågan av stor



vikt. Det är även viktigt att diskutera om, och i så fall hur, information om ett slutförvar och dess faror förs vidare till framtida generationer.

- Hur djupt kan man borra med dagens teknik och är det tillräckligt precist för att genomföra djupa borrhål som slutförvar av kärnavfall?

För att metoden djupa borrhål ska fungera krävs en borrhåsteknik som överträffar det som hittills funnits på marknaden när det gäller både dimensioner och precision. Även tidsaspekten är viktig, hur lång tid kommer det ta att färdigställa ett borrhål? Om tekniken inte finns idag kan frågan om utveckling beaktas. Kommer utvecklingen vara tillräcklig och i så fall, kommer den vara tillämpbar på svensk berggrund? Frågan om material och metod för att slutligen försluta borrhålen är också viktig.

- Vilka säkerhetsaspekter finns kring deponering och upptag av kärnbränslet?

Att föra ner kapseln i borrhålet på ett säkert sätt, utan att riskera att den fastnar och går sönder, är en av de största utmaningarna med metoden djupa borrhål. Kan kapseln utformas på ett sådant sätt att deponeringen underlättas? Borrhål har en tendens att deformeras av de stora spänningar som råder i berget, kan det leda till att deponeringen försvåras?

### 3 BAKGRUND

I Sverige togs det första kärnkraftverket i drift år 1954. Reaktorn, R1, låg insprängd i berget under KTH-området i Stockholm och användes för forskning. År 1972 fick Sverige sitt första kärnkraftverk för kommersiellt bruk, Oskarhamn 1, beläget i Oskarhamn (World Nuclear Association, 2011). Sedan dess har Sverige byggt ytterligare 11 kärnkraftsreaktorer, varav 10 fortfarande är i drift (Strålsäkerhetsmyndigheten, 2010). I dagsläget kommer ungefär hälften av den el som produceras i Sverige från kärnkraftverk (Vattenfall, 2011). Tillsammans producerar de svenska kärnkraftsreaktorerna 250 ton högaktivt kärnavfall per år (Ergon, 2011). Det slutförvar som planeras i Sverige ska rymma 12 000 ton använt kärnbränsle (Freudenthal, personlig kontakt, 20 maj, 2011).

Det finns tre typer av radioaktivt avfall. Dessa är högaktivt avfall från kärnkraftsreaktorer samt låg- och medelaktivt avfall producerat av sjukhus och industrier. Till det senare räknas även använda verktyg och rivningsmaterial från kärnkraftverken. För låg- och medelaktivt avfall finns redan ett slutförvar för radioaktivt driftavfall, SFR. Anläggning är belägen på ca 50 meters djup i urberget i Forsmark. Sverige har kommit långt även när det gäller att utveckla ett slutförvar för använt kärnbränsle. I väntan på att ett sådant byggs mellanlagras allt högaktivt avfall i centrala mellanlagret för använt kärnbränsle, CLAB, beläget i Oskarshamn (SKB, 2011).

I Sverige används två olika typer av kärnreaktorer. Kokvattenreaktorer har bränsleelement som kallas PWR och tryckvattenreaktorer har bränsleelement som kallas BWR. Båda typerna är lättvattenreaktorer och drivs av uran som anrikats för att höja halten av uran-235 som är själva bränslet i kärnreaktorn. Bränslet består till största del av isotoperna uran-238 och uran-235 som båda är radioaktiva. Efter det att bränslet använts i reaktorn har dess radioaktivitet höjts och ämnen med lång halveringstid bildats. Halveringstiden är ett mått på hur lång tid det tar för ett ämnes radioaktivitet att sjunka till hälften (SKB, 2007).

Enligt Sveriges lag (Kärntekniklagen 1984:3 10§) är kärnkraftsindustrin skyldig att ta hand om det använda kärnbränslet genom att utveckla ett säkert slutförvar. SKB har i 30 års tid undersökt olika alternativ för detta ändamål. Den mesta av deras forskning bedrivs på Äspölaboratoriet utanför Oskarhamn. Äspölaboratoriet kan liknas vid en generalrepetition inför byggandet av kärnbränsleförvaret (SKB, 2011). Här pågår storskaliga tester av den metod som SKB kallar KBS-3. Metoden bygger på ett flerbarriärssystem där kopparkapslar är omgivna av bentonitlera och förvaras på 500 m djup i berggrunden.

I mars 2011 skickade SKB in en ansökan till Miljödomstolen och Strålskyddsmyndigheten om att bygga ett slutförvar för använt kärnbränsle i Forsmark i form av KBS-3. Besked angående ansökan förväntas komma under år 2014 och om beskedet är

positivt beräknas en anläggning för slutförvar av använt kärnbränsle tas i drift runt år 2025 (SKB, 2011).

I miljöbalken (6 kap, 7§) kan utläsas att alternativa metoder bör läggas fram för att visa att den bästa valts. Den metod som fortfarande diskuteras som ett möjligt alternativ i Sverige är djupa borrhål. Metoden har i och med SKB:s ansökan fått ett uppsving eftersom vissa anser att den inte har utretts tillräckligt. När SKB beslutade att utveckla KBS-3 ansåg de att borrhållstekniken som krävs för djupa borrhål låg alldeles för långt fram i tiden. Idag anser somliga att teknikutvecklingen nästan är där. Sedan 70-talet har 25 borrhål på över 3000 m borrhålls djup byggts runt om i världen i kristallint berg, varav ett i Sverige. Hålet benämns Gravberg-1 och ligger i Siljanområdet (Juhlin & Sandstedt, 1989). De borrhål som har haft störst betydelse för utvecklingen av konceptet djupa borrhål i Sverige är framförallt (Grundfeldt, 2010; Åhäll, 2006):

- Gravberg-1, Orsa, Sverige (6957 m)
- KLX02, Laxemar, Sverige (1700 m)
- Böttstein, Schweiz (1501 m)
- RH-12, England (1000-2000 m)
- KTB, Tyskland (9101 m)
- Djupborrhålet SG, Kolahalvön, Ryssland (12 262 m)

## 4 GEOLOGI

### 4.1 SVERIGES BERGGRUND

Europas berggrund kan delas upp i olika geografiska delar baserat på när de har bildats. Den största delen av Sverige tillhör den baltiska skölden som är en av de äldsta i Europa. Den baltiska skölden består av urberg från prekambrisk<sup>1</sup> ålder som täcks av sedimentär bergart på vissa ställen. Urberget är kristallint berg med granit och gnejs som de vanligaste förekommande bergarterna (Juhlin, Wallroth, Smellie, Eliasson, Ljunggren, Leijon & Beswick, 1998).

#### 4.1.1 Geologiska modeller ner till 5 km djup

De geologiska modeller som finns för svensk berggrund på stora djup är gjorda av Juhlin och Sandstedt (1989) samt Juhlin m.fl. (1998). Den senare modellen baseras delvis på information från 1989, men innehåller även nyare forskningsresultat. Det redogörs för de båda modellerna nedan.

Den geologiska modell som Juhlin och Sandstedt presenterade 1989 baseras på resultaten från Gravberg-1 borrhålet i Siljans Ringen. Berggrunden nära Siljan har formats av ett meteoritnedslag som skedde för ungefär 360 miljoner år sedan. Detta medförde att sprickförekomsten i berggrunden nära meteoritnedslaget ökade. Trots det anses resultaten från borrhningarna vara representativa för mycket av Sveriges geologi. Det kan till och med vara så att konduktiviteten och mängden öppna sprickor är mindre i andra delar av Sverige än kring Siljan. I Gravberg-1 återfinns sju olika graniter och insprängda mellan dessa finns områden med diabas med en tjocklek på 3-60 m och längd upp till 15 km. Graniten runt om diabasområdena innehåller många sprickor där vätskor kan förflyttas. Förutom områdena med diabas finns även finkornig granit insprängd i berget nedanför 5400 m. Sprickzoner är mer förekommande i de övre 1200 m. Nedanför 1200 m finns också sprickzoner, men de är inte lika frekvent förekommande. Det är enligt Juhlin och Sandstedt svårt att uttala sig om det är öppna sprickor och om dessa kan innehålla vätskor då det saknas undersökningar av konduktiviteten i dessa sprickzoner. De hydrauliska tester som ändå gjordes visar att den hydrauliska konduktiviteten ligger i intervallet  $10^{-9}$ - $10^{-10}$  m/s (Juhlin & Sandstedt, 1989).

Juhlin m.fl. presenterade 1998 en geovetenskaplig modell ner till 5 km djup i svensk berggrund. I modellen konstateras att i den översta kilometern av den baltiska skölden finns mer sprickor än djupare ner i berget. Det konstateras vidare att områden där topografin har låg variation återfinns vatten med hög salthalt redan vid 1 km. I områden där topografin har stor variation kan saltvattensgränsen ligga så djupt som 10 km ner, dock har detta ej bekräftats med borrhning. Gällande temperaturvariationerna

---

<sup>1</sup> Tidsåldern från 4600 miljoner år sedan till 542 miljoner år sedan.

i marken tros de vara så pass små att de inte påverkar vattencirkulationsmönstren (Juhlin m.fl., 1998).

Kunskap om hur litologin<sup>2</sup> förändras är viktig vid planering av djupa borrhål då förändring i berggrunden oftast hör samman med svaghetszoner. Exempel på svaghetszoner är sprickzoner, förkastningszoner, deformationszoner, eller zoner mellan två olika bergarter där tänkbar rörelse kan lokaliseras. Vissa mineral är relevanta för vätsketransport i marken och det är därför viktigt att veta vad berggrunden består av. Mineralen, som utgör berggrunden, har egenskaper som avgör berggrundens porositet och det är även av detta skäl som det är viktigt att känna till litologin (Juhlin & Sandstedt, 1989).

#### 4.1.2 Krav på geologin vid slutförvar med djupa borrhål

Slutförvaring av använt kärnbränsle i djupa borrhål i kristallint berg förväntas ge en långvarig<sup>3</sup> effektiv isolering av radioaktiva ämnen från biosfären. Kristallint berg är relativt homogen natur och är motståndskraftigt mot deformation (Brady, Arnold, Freeze, Swift, Bauer, Kanney, Rechar & Stein, 2009). Det är att föredra att placera slutförvaret i homogen berggrund med låg permeabilitet<sup>4</sup>, men det är inte ett krav (Juhlin & Sandstedt, 1989), se även avsnitt 5.2.4 Sprickornas betydelse för flödet i berggrunden. Granit förefaller ha lägre permeabilitet än gnejs. I de djupa borrhål som gjordes innan 1989 i områden som inte är tektoniskt aktiva, sågs att permeabiliteten är låg på djup större än 2000 m. Områden med stora vertikala sprickzoner bör undvikas eftersom dessa leder till hög permeabilitet.

Långt ner i berggrunden ändras vattnets salthalt till att bli mycket salt. Detta saltvatten är nästintill stagnant<sup>5</sup> och tros vara flera hundra miljoner år gammalt (Juhlin m.fl., 1998). Sannolikheten att hitta vatten med hög salinitet i kristallint berg är stor. Var saltvattensgränsen går kan skilja sig mellan olika områden i Sverige, men det finns indikationer på att den ligger ytligare närmare Östersjön jämfört med i inlandet. Lokalisering av områden med vatten med hög salinitet anses vara viktigare än att hitta en plats med få sprickor för konceptet djupa borrhål (Juhlin & Sandstedt, 1989), se avsnitt 5.3.1 Salthalt.

För att kunna säkerställa en god förslutning av slutförvaret krävs en plats där anisotropin<sup>6</sup> är liten annars riskeras bergutfall<sup>7</sup> i borrhålet. I Gravberg-1 skedde bergutfall av extrem karaktär. Andra djupa borrhål har inte haft samma problem.

---

<sup>2</sup> Läran om berggrunden.

<sup>3</sup> Mer än 1 miljon år.

<sup>4</sup> Genomsläpplighet.

<sup>5</sup> Stillastående.

<sup>6</sup> Materialets egenskaper är olika i olika riktningar vilket kan leda till spänningsskillnader.

<sup>7</sup> Delar av berget deformeras efter att ett borrhål gjorts.

Kunskap om spänningstillståndet och litologin är viktigt för att förutse bergutfall från borrhålet (Juhlin & Sandstedt, 1989).

### 4.1.3 Framtida kunskap om berggrunden

The Swedish Deep Drilling Program, SDDP, ska förhoppningsvis starta ett projekt där flera djupa borrhål ska göras i svensk berggrund för att undersöka förkastningar, bergkedjans utseende, hydrologiska förhållanden på stort djup med mera. Undersökningarna beräknas börja sommaren 2012 på flera platser i Sverige, bland annat nära Åre i Jämtland. Resultaten från dessa borrhål kan komma att ge kunskaper som kan användas för att föra diskussionen om djupa borrhål som slutförvar vidare (Juhlin, personlig kontakt, 14 april, 2011).

## 4.2 NATURLIG KÄRNREAKTOR I OKLO, GABON

En fingervisning på hur berget skulle påverkas av ett eventuellt läckage av radionuklider kan fås genom att studera den naturliga kärnreaktor som uppkom i Gabon för 2 miljarder år sedan.

I Oklo, 25 km norr om Moanda i sydöstra Gabon, hittades på 70-talet resterna från världens första naturliga kärnreaktor (Jensen & Ewing, 2001). Här har resterna från denna kärnreaktor förvarats i 2 miljarder år (Evins, 2003). Totalt hittades 14 naturliga kärnreaktorer i detta område. Dessa reaktorer kunde lätt kännas igen på grund av den låga uran-235/uran-238 kvoten. Normalt sett ligger kvoten på 0,7253 % men i detta fall var den endast 0,292 %. Tidigare analyser som gjorts har visat att naturliga fissionsreaktioner oftast sker i områden som domineras av förkastningar och mikrosprickor (Jensen & Ewing, 2001). Reaktorerna tros ha befunnit sig 2-3 km ner i berget under tiden de var aktiva (Evins, 2003).

Ett flertal studier har gjorts i detta område och dessa har visat att kriticitet<sup>8</sup> uppkom i berget. Även om en del uran läckte ut producerades nya neutroner genom klyvning (Jensen & Ewing, 2001). Uranmalmen hade då rätt sammansättning och vatten fanns som moderator, detta innebar att vatten saktade ner neutronerna vilket var ett krav för att reaktionerna skulle fortgå. Till en början innehöll berget i Oklo för lite vatten (Evins, 2003). Mängden organiskt material tros ha spelat en viktig roll då det ökade porositeten i omgivningen och stabiliserade uranet (Jensen & Ewing, 2001). När porositeten ökade fick berget fler vattenförande sprickor och reaktionerna satte i gång. Den höga temperaturen i kombination med det höga trycket fick saltvattnet att börja koka. Rörelsen av saltvatten i berget gjorde att all kvarts löstes upp och volymen av malmen minskade till 0,70 m från att tidigare ha uppgått till 5 m. Sammansättningen av malmen ändrades från att bestå av 10 % uranit, 10 % lermineral och 80 % kvarts till att bestå av 50 % uranit och 50 % lermineral (Evins, 2003).

---

<sup>8</sup> Kedjereaktion av kärnklyvningar.

Kriticiteten varade i 100 000-800 000 år och temperaturen i berget uppgick då till 250-400°C i området närmast reaktorn. Temperaturen i centrum av reaktorn kan ha uppgått till 1000°C. Den höga temperaturen förändrade och omformade den omgivande berggrunden. I kärnan av reaktorn löstes kvarts upp och det bildades fyllosilikater som dominerades av illit i centrum med omgivande klorit (Jensen & Ewing, 2001). Idag är reaktorkärnan 0.5 m tjock och 30 m bred och består av uranit som omges av illit och klorit. Av de radioaktiva ämnena som bildades under reaktionerna finns inte mycket kvar idag. Strontium och cesium tros ha transporterats bort redan under tiden när reaktionerna fortfarande pågick och teknetium har bildat små klumpar inuti uraniten (Ewins, 2003).

Det finns vissa paralleller som kan dras mellan den naturliga kärnreaktorn och ett slutförvar djup berggrund. Uraniten kan liknas vid det använda kärnbränslet som ska deponeras i borrhålet och lermineralet runt om reaktorkärnan kan liknas vid bentonitleran. Det finns dock inget som kan liknas vid någon typ av kapsel. Reaktionerna i Oklo kan alltså ge en bild av vad som skulle kunna hända med berget om kapseln går sönder (Ewins, 2003).

### 4.3 TEMPERATUR

En viktig aspekt för berget som förvaring av det använda kärnbränslet är hur hög temperaturen i borrhålet är och hur deponering i berget påverkar olika parametrar, såsom grundvattnets egenskaper och flödes hastighet. Temperaturen är även viktig att undersöka för att veta vilka krav som måste ställas på kapseln som förvarar det använda kärnbränslet. Detta eftersom en hög temperatur tillsammans med en hög salthalt ökar risken för korrosion av kapselmaterialet men även på bränslestavarna (Brady m.fl., 2009).

Eftersom permeabiliteten är låg på större djup betyder det att värmetransporten främst sker genom värmeledning, eller så kallad konduktion. Konvektion<sup>9</sup> kan förekomma till viss mån men på grund av den låga flödes hastigheten och medelporositeten i berget är bidraget så litet att det kan försummas (Skagius, 2010). Det är därför väldigt viktigt att man undersöker bergets termiska konduktivitet, där det använda kärnbränslet skall förvaras, för att veta vilken temperaturgradient i berget som kan förväntas.

Temperaturgradienten ser olika ut för olika bergsmaterial men den varierar också beroende på vart i världen man befinner sig. I ett av de djupa borrhålen i Siljan uppmättes temperaturgradienten till 16,1°C/km, vilket anses vara representativ för Sveriges övriga berggrund (Juhlin & Sandstedt, 1989). Denna gradient kan användas för att extrapolera temperaturen ned till 5 kilometers djup som då blir 80,5°C. Lägre gradienter har uppmätts på 11 utvalda platser i Sverige och visar generellt en

---

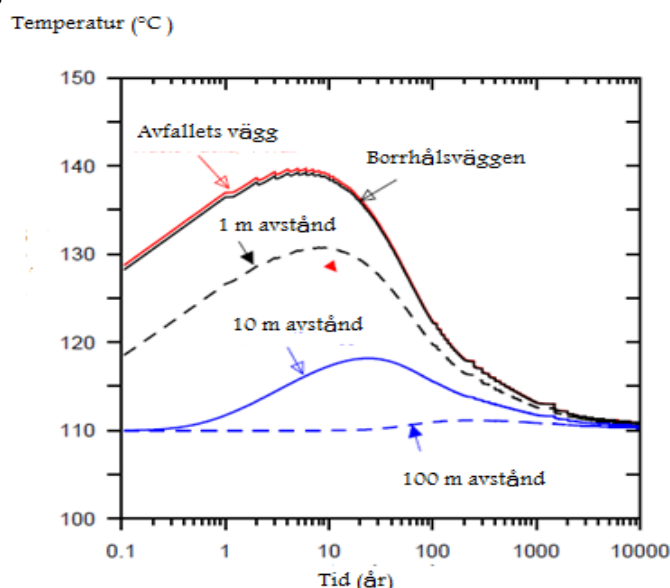
<sup>9</sup> Värmeledning genom en vätska eller gas (Nationalencyklopedin, 2011).

gradient under  $15^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , vilket vid 5 km djup kan ge en genomsnittlig temperatur på så lågt som  $60^{\circ}\text{C}$  (Juhlin m.fl., 1998). Skillnaden kan bland annat bero på cirkulationen av ytvatten eller på kylningseffekten från istäcket under den senaste perioden av nedisning (Juhlin & Sandstedt, 1989).

Förutom den naturliga temperaturgradienten i berget måste man även räkna med den temperaturökning som sker då det använda kärnbränslet läggs på plats. Detta har undersökts genom att 45 borrhål simulerats i form av ett rutnät. Dessa har fyllts med 300 kapslar med använt kärnbränsle per borrhål och värmen som avgetts har sedan mätts på olika avstånd från borrhålen (Marsic, Grundfelt & Wiborgh, 2006). Beräkningarna har gjorts för ett djup på 3 km och med en temperaturgradient på  $16,1^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , detta motsvarar  $48^{\circ}\text{C}$  för det omgivande berget. Kapslarnas initiala temperatur var ungefär  $80^{\circ}\text{C}$  men temperaturen minskade till  $65^{\circ}\text{C}$  efter 100 simulerade år. Efter ett par hundra år förväntas kapslarnas temperatur vara nere på samma nivå som det omgivande bergets (Marsic m.fl., 2006).

Det har diskuterats om temperaturökningen som uppstår vid nedförandet av kapslarna kan göra så att det sker en densitetsändring i det saltvatten som finns där. Detta skulle kunna bidra till att vattnet blir mer rörligt och på så sätt inte fyller sin roll som barriär. Beräkningar har dock gjorts som visar på att det termiska flödet och varaktigheten från kapslarna är för låg för att destabilisera saltvattnet (Marsic m.fl., 2006).

Undersökningar om hur det använda kärnbränslets temperatur påverkar bergets har även gjorts i Yucca Mountain i Nevada, USA. Där simulerades temperaturen för ett borrhål, med en diameter på 50 cm och ett djup på 4 km, och det omgivande berget. Modellen använde värmeflödet från förbrukat PWR-bränsle som åldrats i 25 år. Här mättes och simulerades sedan temperaturförloppet för det använda bränslets vägg, borrhålets vägg och sedan från borrhålets mitt till olika avstånd i berget, se figur 1.



Figur 1. Temperaturen som en funktion av tid och avstånd från mitten av borrhålet för använt PWR-bränsle. (efter Brady, Arnold, Freeze, Swift, Bauer, Kanney, Rechar & Stein, 2009, s. 23).



Temperaturgradienten antogs vara 25°C/km, vilket generellt är högre än den för svenska berggrund, och bergets grundtemperatur 110°C. Resultatet av simuleringarna visade att temperaturökningen i närheten av borrhålet var liten, kortvarig och minskade fort med avståndet från borrhålet. Som högst var temperaturen vid borrhålsväggen runt 30 °C högre än det omgivande berget, sett inom en 10 års period. Temperaturökningen hade kunnat bli betydligt högre om det använda bränslet inte hade åldrats lika länge i ett mellanlager (Brady m.fl., 2009).

Det är relevant att veta om det kommer att bildas ett värmeelement under marken på grund av att det använda kärnbränslet i kapslarna påverkar varandra termiskt. Dock har simuleringar visat att borrhål som placerades minst 200 meters från varandra inte gav någon termisk påverkan på varandra (Brady m.fl., 2009).

#### 4.4 BERGSPÄNNINGAR

Att ha god kännedom om spänningarna i berget är helt avgörande när man ska borra ett djupt borrhål i kristallint berg. När borrhålets kärna plockas ut från borrhålet minskar trycket just på den platsen. Detta leder till att det omgivande berget kommer att försöka utjämna tryckskillnaden som uppstår, vilket efter en viss tid leder till att spänningarna i berget deformerar hålet. Bergspänningarna kan därmed orsaka stora problem eftersom en deformation av hålet kan innebära att det blir omöjligt att påbörja deponering av det använda kärnbränslet, eller en risk för att det fastnar under deponeringen. Detta kan dock förhindras om man har ett tillräckligt starkt foderrör som förs ned i samband med borrhållningen och motverkar deformation.

För borrhålet Gravberg-1 beräknades de vertikala spänningarna i berget genom att beräkna trycket som den överliggande massan har på olika djup, se ekvation 1.

$$S_v = 0,027 \cdot z \text{ [MPa]}, \quad (1)$$

där  $z$  är djupet uppmätt i [m] och  $S_v$  är den vertikala spänningen (Juhlin & Sandstedt, 1989).

Spänningen i berget verkar öka linjärt med djupet. Noteras bör att kvantitativa mätningar under 1 kilometer saknas för den baltiska skölden. Nere på 5 km djup ges utifrån ekvation 1 en vertikal spänning på 135 MPa. Sammanställning och analys av spänningsdata visar att de maximala och minimala horisontella spänningar nära jordytan överstiger den vertikala. Vid djup runt 500m blev däremot den vertikala spänningen den dominerande. Den maximala horisontella spänningen är störst för alla djup även om skillnaderna är små. För att beräkna maximal och minimal horisontell spänning i den baltiska skölden kan ekvation 2 och 3 användas (Juhlin & Sandstedt, 1989):

$$S_H = 0,043 \cdot z + 12 \text{ [MPa]} \quad (2)$$

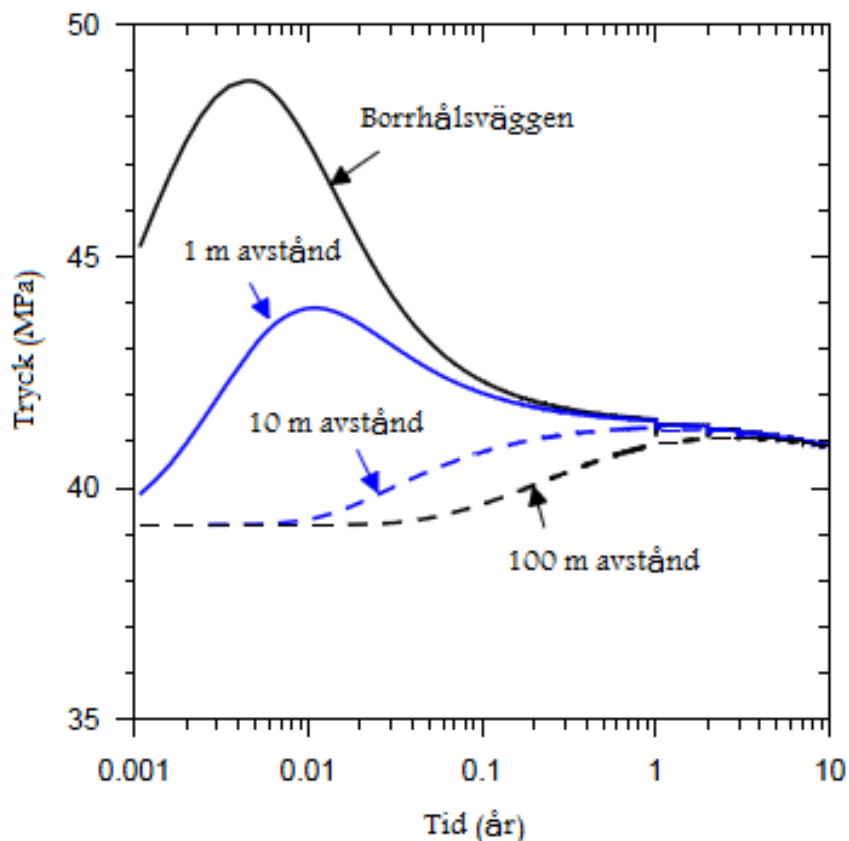
där  $z$  är höjden uppmätt i [m] och  $S_H$  är den maximala horisontella spänningen.

$$S_h = 0,028 \cdot z + 18 \text{ [MPa]} \quad (3)$$

där  $z$  är höjden uppmätt i [m] och  $S_h$  är den minimala horisontella spänningen.

Ett annat resultat på bergspänningar uppvisades efter simuleringar i Yucca Mountain där data på horisontell spänning i skorpan gav en spänningsgradient på 24 MPa/km (Japan Nuclear Cycle Development Institute, 2000). Genom att använda denna uppskattning blir det genomsnittliga horisontella trycket på 5 km djup 120 MPa (Brady m.fl., 2009).

Det gjordes även en värmeledningsmodell, i vilken värme och vätskeflöde sammanställdes, för huruvida bergets permeabilitet skulle öka på grund av hydrofracturing<sup>10</sup>. I figur 2 ses det simulerade vätsketrycket som funktion av tiden för olika avstånd från förvaret. Det högsta trycket fås nära borrhålet några dagar efter deponering och förslutning av det använda kärnbränslet. För att hydrofracturing ska kunna ske måste vätsketrycket överstiga det omgivande trycket i berget och eftersom detta inte sker enligt modellen kan detta bortses från (Brady m.fl., 2009).



Figur 2. Simulerat vätsketryck för olika horisontella avstånd från mitten av ett borrhål fyllt med använt kärnbränsle (efter Brady m.fl., 2009, s.42).

<sup>10</sup> Termisk expansion av vattnet i berget. Svensk term saknas.

## 4.5 ISTIDER

Ett av kraven på slutförvaret för använt kärnbränsle är att det skall vara säkert i minst 100 000 år. Denna långa och oöverskådliga tidsperiod kommer förmodligen föra med sig stora klimatförändringar. Skandinavien och Sverige kommer med största sannolikhet att uppleva en istid, hamna under ett stundtals kilometertjockt istäcke och drabbas av allt som följer med detta.

### 4.5.1 Varför inträffar istider?

Istider inträffar på grund av klimatförändringar som uppstår av variationer i solinstrålningen mot Jorden. Detta beror på att förhållandet mellan Jorden och solen inte är konstant utan jordbanans form ändras och att jordaxeln lutar olika mycket med tiden. När jordaxelns lutning är minimal leder det till ett kallare klimat (Perhans, 2002).

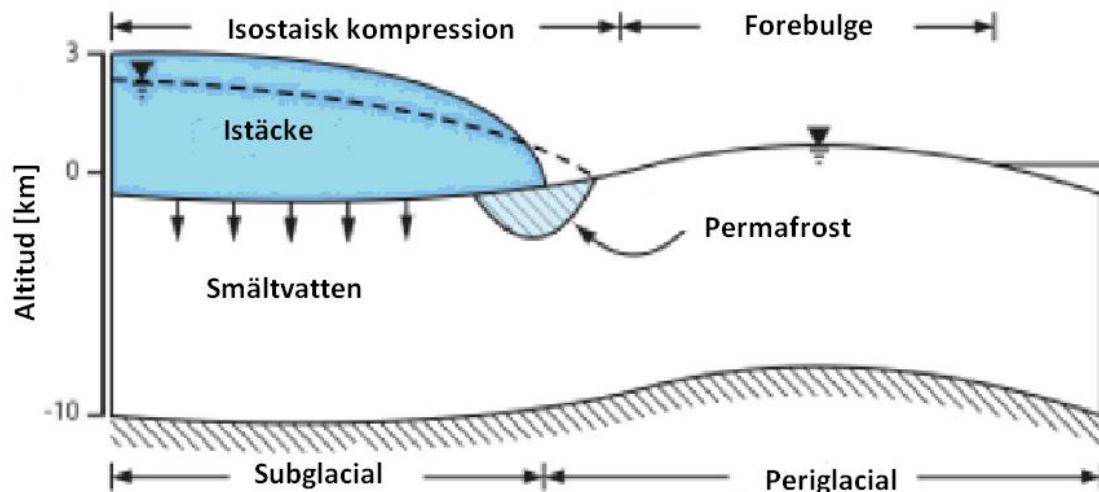
Trots intensiv forskning är det svårt att veta hur förra istiden "Weichsel" började och hur den initialt bredde ut sig. Det är däremot relativt lätt att följa ändmoränerna i naturen och på så vis uppskatta isens maximala utbredning och iskantens tillbakagång vid olika tidpunkter. Tjockleken på isen är däremot besvärlig att bedöma. Det uppskattas att Weichsel som mest var ca 3 000 m tjock och då tryckte ner berggrunden 500-800 m med ett tryck på ca 30 MPa. En is kan inte bli hur tjock som helst utan är plastisk och faller sönder av sin egen tyngd (Lund, personlig kontakt, 13 april, 2011). När SKB modellerar nästa istid används information från olika istider. Den näst senaste istiden "Saale" var bland annat betydligt större över Skandinavien än vad Weichsel var. Detta framgår av lämningar i landskapet som kan dateras på olika sätt, exempelvis med termoluminesensmetoder<sup>11</sup> (Näslund, personlig kontakt, 11 maj, 2011).

Under istiden tillväxer isen både av kristalliserad snö och av havsvatten. Förändringar i havsnivån kan uppmätas till exempel på Barbados där det finns spår av att havsytan på Jorden var 120 m lägre än idag under förra istiden (Lund, personlig kontakt, 13 april, 2011). Det finns även ett begrepp forebulge<sup>12</sup> som är viktigt att nämna i sammanhanget. Forebulge är termen för markhöjningen som bildas framför en inlandsis när isen drar fram i landskapet och påverkar spänningarna i berggrunden, se figur 3.

---

<sup>11</sup>Typ av dateringsmetod.

<sup>12</sup> Svensk term saknas.



Figur 3. Isens tyngd trycker magman åt sidan så att en forebulge bildas framför iskanten (I Jaquet, efter Lemieux, 2006, s. 9).

I Nordamerika uppstod flera vågor av forebulges i samband med den senaste istiden. Skandinavien påverkades av dem i form av jordskalv. Att forebulges uppstår beror på att Jordens massa alltid är konstant och måste ses ur ett globalt perspektiv. När det byggs en inlandsis sänker det havsnivån på hela Jorden vilket leder till att massfördelningen på kontinentalplattorna förändras. Därför kan en inlandsis i Nordamerika påverka spänningarna i berggrunden i Skandinavien (Näslund, personlig kontakt, 11 maj, 2011). Genom att modellera utifrån havsvattenståndet försöker forskare datera och utforska föregående istid (Lund, personlig kontakt, 13 april, 2011).

#### 4.5.2 När kommer nästa istid inträffa?

Ingen kan göra en exakt prediktion av klimatet ens 100 år framåt i tiden, så självklart är det omöjligt att prediktera hur klimatet på Jorden är om 100 000 år. Med detta i bakhuvudet inses att det är väldigt svårt att förutsäga när nästa istid ska komma. SKB har världsledande forskare på området och deras forskning kan därför anses relevant. De använder sig av ett angreppssätt där de förutspår fall med en bred variation där både klimatet, isens tjocklek och isens utbredning kan variera. SKB använder sig inte av en enda glaciationsprognos, utan av en mängd numeriska metoder som bygger på många olika modeller. Osäkerheten i beräkningarna hanteras genom att utgå från gränssättande fall och extrema situationer, som exempelvis att det inte sker någon antropogen påverkan på klimatet eller att istiden fördröjs. Prognoserna innefattar att det värsta scenariot kan inträffa. I sin bedömning kan SKB inte heller bara titta på en faktor, som exempelvis isens maximala tjocklek, och säga att det är den värsta faktorn. Olika faktorer kan vara farliga och kritiska för slutförvaret på olika sätt. Därför modellerar SKB från alla gränssättande fall och betraktar alltid problemet ur ett helhetsperspektiv (Näslund, personlig kontakt, 11 maj, 2011). Två andra framstående klimatmodeller som används för att förutsäga istider är ACLIN

(Astronomical Climate Index) samt Imbrie & Imbrie. Båda utgår från Milankovitch's teori om jordaxelns lutning (Öström, 1993).

SKB publicerade 1993 ett faktablad där nedisningsförloppet förutspåddes enligt nedanstående. Öström (1993, s. 3) skriver:

- *0 - 10 000 år. Klimatet i Skandinavien blir gradvis kallare. Ett istäcke kommer att uppstå i fjällkedjan med maximal utsträckning om ca 5 000 år. Jordskorpan under istäcket trycks ned ca 300 meter. Stockholm är inte istäckt men har ett mycket kallt klimat med ständig tjäle. Havsnivån kommer att sjunka mellan 5 och 50 meter.*
- *10 000 - 30 000 år. Efter en kortvarig, något varmare, period kommer en ny istid med maximum om ca 20 000 år. Isen är på det tjockaste stället 1500 meter. När isarna är som störst kommer istäcket att nå Mälardalen. I Stockholmsområdet är isen ca 800 meter tjock vilket trycker ner jordskorpan i området ca 60 meter innan isen drar sig tillbaka.*
- *30 000 - 50 000 år. En mellanperiod med torrt och kallt klimat som liknar det på dagens Grönland. Landhöjningen lyfter Stockholm ca 50 meter och havsnivån ligger ca 50 meter under dagens nivå.*
- *50 000 - 70 000 år. Den kraftigaste istiden med sitt maximum om ca 60 000 år. Hela Skandinavien kommer att vara istäckt. Istäcket över Stockholm är ca 2 500 meter vilket trycker ner vad som är kvar av staden ca 600 meter. När isen så småningom smälter kommer havets nivå att stiga 100 meter över dagens nivå.*
- *70 000 - 80 000 år. Perioden blir varmare. Stockholm har ett klimat som motsvarar dagens i norra Sverige. Landhöjningen återställer markytan till nuvarande nivåer. Havet har samma nivå som idag.*
- *80 000 - 120 000 år. Klimatet blir återigen kallare med ett maximum om ca 100 000 år. Istäcket kommer att vara mycket utbrett. 120 000 - 130 000 år. En varm period med ett klimat som påminner om dagens.*

Oavsett hur mycket som forskas på området kommer forskarvärlden inte kunna förutspå när nästa istid inträffar. Beroende på vem man frågar fås olika teorier och svar. Perhans presenterade i sin publikation 2002 att nästa istid inträffar om tidigast 10 000 år. Bergström skrev 2010 att isen kommer ha sin allra största utbredning om tidigast 30 000 år. Enligt ACLIN-modellen förutspås en istid med maximum om 5000 år, samtidigt som den istiden inte finns med i Imbrie & Imbrie-modellen. ACLIN och Imbrie & Imbrie följer annars varandra väl i sina prediktioner (Öström, 1993). Andra menar att den globala uppvärmningen eventuellt kan fördröja nästa istid eftersom klimatet blir

varmare (Lund, personlig kontakt, 13 april, 2011). Klimatet idag klassas som en mellanistid (Öström, 1993).

### 4.5.3 Jordbävningar

Det förekommer jordbävningar i Sverige trots att landet inte ligger nära någon tektonisk plattgräns. Det rör sig om runt 10 jordbävningar per år som är kännbara. De flesta jordskalven i Sverige sker vid Vänerområdet och Norrlandskusten, det senare eventuellt på grund av den snabba landhöjningen i området (Perhans, 2003). I slutet på förra istiden skedde stora jordbävningar i nordligaste Sverige som bland annat resulterade i Päriviförkastningen. Förkastningssprickan sträcker sig 15 mil och är 10 meter hög (SGU, 2011). I andra områden där isen också var utbredd, exempelvis Nordamerika, finns inga liknande förkastningar (Lund, personlig kontakt, 13 april, 2011). Postglaciala jordskalv efter Weichsel förekommer, vad som är känt, endast i Skandinavien och pågår fortfarande. Forskare vet inte varför skalven bara sker här. Tänkbara faktorer som kan ha påverkat detta är isens geometri, jordskorpanns tjockleksförändring, om inlandsisen var bottenfrusen eller ej, omfattning av permafrost samt lokala hydrogeologiska förhållanden. Osäkerheten kring dessa faktorer är stor och det är möjligt att skalven skapats av andra ännu okända faktorer. Det är bara Weichsel som genererat postglaciala skalv, detta konstateras eftersom att Weichsel annars inte skulle klarat att erodera bort spår efter stora jordskalv från tidigare istider (Munier, personlig kontakt, 11 maj, 2011).

När istiden pågår och isen trycker ner berggrunden förekommer färre jordbävningar då det extra trycket från isen trycker ihop sprickorna i berget från alla håll. Detta kan studeras redan idag på Grönland och Antarktis där frekvensen av jordbävningar under isen är mycket låg (Nilsson, 2006). När isen smälter minskar trycket på berggrunden, men de stora horisontella spänningarna finns kvar och antalet jordbävningar ökar. Jordskalv sker i regel under två km djup, majoriteten på 5-15 km djup. Riktigt stora jordbävningar påverkar hela berggrunden upp till ytan och då spelar det i det avseendet mindre roll om slutförvaret ligger på 500 m eller 3-5 km djup. Jordbävningarna börjar djupt ner och fortplantar sig uppåt (Lund, personlig kontakt, 13 april, 2011). Förhållandet som råder idag mellan ytliga och djupa jordskalv kommer troligtvis fortsätta gälla även om skalvfrekvensen ökar (Nilsson, 2006).

Problematiken med jordskalv är inte skakningen i sig då borrhål och sedan tillslutna hål inte är mer instabila än övrig berggrund. Det är sprickorna i berggrunden som utgör den största risken. Jordbävningar följer enklaste vägen i berget genom sprickor, och påverkar inte borrhål direkt om de inte är borrhål genom en spricka (Lund, personlig kontakt, 13 april, 2011). I en tät berggrund utan sprickor finns risken att nya sprickor bildas vid jordbävningar när stora spänningar frigörs och att sprickorna kan äventyra slutförvarets integritet genom att skada kapslarna. De sprickor som eventuellt uppstår vid djupborrning är av en annan skala än jordskalvsinducerade sprickor och bör inte

göra slutförvaret mer utsatt för jordbävningar. Det är väldigt riskfyllt att borra snabbt och djupt i berggrunden då spänningarna i berget inte hinner anpassa sig till det nya läget och olyckor kan ske. Det kan också leda till att borrhål deformeras. Om bergets struktur långsamt ändras kan berget anpassa sig och spänningen omfördelas på ett bättre sätt. Skador i samband med jordbävningar förväntas bara uppstå ifall en spricka skär genom borrhålet och att en kapsel i slutförvaret knäcks på grund av skjuvning. SKB har räknat noga på detta och funnit att deras kapslar för KBS-3 håller för skjuvning upp till 50 mm. För att få denna skjuvning krävs en spricka som är större än 100 m (Munier, personlig kontakt, 11 maj, 2011). Magnituden på jordbävningen måste vara över 3,5 på Richterskalan för att kunna åstadkomma en sådan stor skjuvning (Lund, personlig kontakt, 24 maj, 2011). Jordskalv av den storleken förekommer enligt seismologen Reynir Bødvarsson regelbundet i Sverige. En jordbävning med magnitud 3 sker i genomsnitt varje år, medan jordskalv av magnitud 4 och upp sker vart tionde år eller mer sällan. (Hellberg, 2005). För djupa borrhål kan inte exakta värden på den skjuvningsstorlek som behövs beräknas på liknande sätt eftersom t.ex. vilket kapselmateriale som skall användas ännu inte fastställts (Munier, personlig kontakt, 11 maj, 2011). Jordskalv längre bort från borrhålet kan också påverka slutförvaret eftersom vattentrycket i borrhålet kan förändras (Lund, personlig kontakt, 13 april, 2011).

Vid djupborrning kan förekomsten av nerpumpat vatten utlösa jordbävningar på grund av det höga trycket som bildas (Lund, personlig kontakt, 13 april, 2011). Vid en borring efter geotermisk energi i Basel utlöste en jordbävning med magnitud 3,5 på Richterskalan. Jordskalvet framkallades inte enbart av borringen men triggades igång av att vatten sprutades in under högt tryck som en del i borrhålets process (Swissinfo, 2007). Vatten har också en smörjande effekt på berget och minskar friktionen mellan bergytter. Detta innebär att tillförsel av vatten kan utlösa jordskalv. Detta hände även i samband med oljeutvinning i USA. Då var magnituden på jordskalven direkt kopplad till mängden nerpumpat vatten (Perhans, 2003).

#### **4.5.4 Jordbävningar som resultat av inlandsisen**

Under en period med glaciation pressar isen ner berggrunden på grund av sin enorma tyngd. Hela skorpan trycks då ner vertikalt och ett slutförvar borde helt enkelt förflyttas med marken, inte förstöras (Lund, personlig kontakt, 13 april, 2011). När isens tyngd trycker ner berget kan det också bildas sprickor där syrerikt vatten kan ta sig ner (Bergström, 2010). De annars viktigaste faktorerna som en istid för med sig är ändrade grundvattenflöden och jordskalv. Vatten som idag är stillastående kan vid sprickbildning blandas om med färskt vatten och bli rörligt (Näslund, 2007). Isen kan, som tidigare nämnts, även passera och retirera flera gånger under en 100 000 års period då ändra grundvattenflödena flera gånger. När slutförvaret är färdigställt måste försiktighet iaktas så att borrhålet är helt förslutet och ingen omblandning med ytvatten kan ske (Lund, personlig kontakt, 13 april, 2011).

Inlandsisar i sig skapar inte jordbävningar, det är plattetektonik som är den drivande kraften. Däremot kan isen knuffa en deformationszon över stabilitetsgränsen så att ett skalv utlöses beroende på att isen smälter snabbare än den byggdes upp. Detta leder till en plötslig tryckförändring som ändrar spänningsförhållandena i berget. För att detta ska ske krävs att sprickan har en viss storlek (Munier, personlig kontakt, 11 maj, 2011).

Risken med jordbävningar i scenariot där isen drar fram och retirerar över en plats flera gånger är inte förhöjd. Detta kan verka underligt men har en enkel förklaring. Det behövs tillräckligt med tid för att ladda upp de spänningar som behövs för att generera ett skalv. Om en forebulge nyligen passerat och framkallat en jordbävning, och samma sak sker kort tid därefter, kommer berget i området att vara för avslappnat för att kunna framkalla ett nytt skalv. Det är därför onödigt att lägga ett förvar längre upp i norra Sverige för att slippa isens fram- och tillbakaryckningar. Det är dessutom olämpligt eftersom Norrlandskusten är det jordskalvstättaste området i Sverige. (Munier, personlig kontakt, 11 maj, 2011).

Däremot är risker förknippade med jordbävningar större för djupa borrhål än KBS-3 (Munier, personlig kontakt, 11 maj, 2011). Detta gäller ur det avseendet att inspektion av berget aldrig kommer kunna ske på 3-5 km djup på samma sätt som för KBS-3 och inte heller se var sprickorna i berget finns. På 500 m djup kommer geologer kunna inspektera samtliga borrhål och undvika kritiskt stora sprickor, denna möjlighet finns inte för djupa borrhål. Risken är då att kapslar deponeras mitt i en sprickzon. Det är möjligt att det i framtiden utvecklas instrument för att bättre kartera berggrunden på 3-5 km djup men helhetsbilden kommer troligen inte kunna bli lika grundlig (Munier, personlig kontakt, 11 maj, 2011).

#### **4.6 BAKTERIERS PÅVERKAN**

Många mikrober är väldigt, väldigt små och lever i utrymmen med hög temperatur. Det är därför gynnsamt för dem att leva i den djupa berggrunden där temperaturen ökar med djupet (Pedersen, 2010). I Sverige dominerar äldre kontinental berggrund och temperaturen på 3-5 km djup förväntas ligga runt 105°C i orört berg (Åhäll, 2006). Temperaturen är förmodligen den största faktorn som påverkar bakteriernas existens och majoriteten av dem kan inte leva i en miljö med temperaturer över 115°C (Smellie, 2004). Däremot kan bakterierna påverka den geokemiska miljön i berggrunden ända tills temperaturen når denna gräns (Åhäll, 2006). Förutom temperaturen är det vatten- och koltillgången som är avgörande för bakteriernas närvaro i berggrunden (Pedersen, 2010). Bakteriernas antal begränsas även av virus som angriper dem, så kallade bakteriofager (Eydal, 2009). Forskare har hittat bakteriofager som är aktiva i djupt grundvatten ner till åtminstone 450 m (Pedersen, 2010).

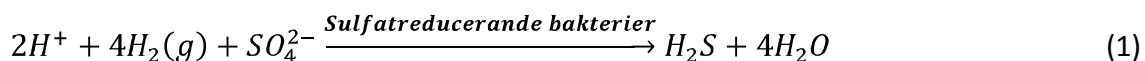
Forskning på kontinentala sedimentära bergarter visar att levande mikrober är aktiva på åtminstone 3 km djup (Onstott, Phelps, Colwell, Ringelberg, White & Boone, 1998).



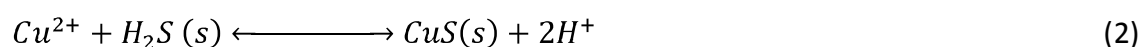
Förmodligen återfinns mikrober ännu djupare, så länge som temperaturen tillåter. I olika borrhål, så djupt som ca 5000 m, har bakterier funnits. Deras förekomst är inte beroende av hur djupt som borrhåts utan snarare av värmen från berget (Pedersen, 2010). Det finns även en sammanställning av data från en fältstudie i Olkiluoto, Finland (2004–2007) som visar att metan och väte fungerar som energikälla för vissa bakterier (Pedersen, Arlinger, Eriksson, Hallbeck & Johansson, 2008).

En viktig fråga i debatten om slutförvaret är transporten av radionuklider från läckande kapslar till ytan. Forskare förväntar sig i dagsläget att transporten av radionuklider från slutförvaret ska mildras av adsorption till det omgivande berget (Anderson, Jakobsson & Pedersen, 2007). Men i ett underjordiskt slutförvar har det framkommit att ytorna är täckta med ett naturligt organiskt material där bakterierna kan bilda biofilmer<sup>13</sup>. Dessa biofilmer har visat sig skapa en barriär mellan radionukliderna och berggrunden (Anderson, Jakobsson & Pedersen, 2006). Enligt andra studier bekräftas att biofilmerna minskar berggrundens adsorptionsförmåga vilket möjliggör en snabbare transport av radionuklider mot ytan (Anderson m.fl., 2007). Detta bör tas hänsyn till när ett slutförvar för använt kärnbränsle konstrueras.

Mikrobernas processer i berggrunden får inte förbises när ett slutförvar för använt kärnbränsle designas, kanske allra främst när det gäller valet av kapselmaterial (Pedersen, 2005). Det finns bakterier på djupet i berggrunden som kan producera svavelprodukter vilka är starkt korrosiva på en kopparkapsel (Swahn, 2011). Dessa kallas sulfatreducerande bakterier och verkar som katalysatorer då väte och sulfatjoner bildar svavelväte, se reaktionsformel 1.



Sulfatjoner och väte finns naturligt i berggrunden. Reaktionen är betydelsefull att beakta eftersom svavelväte är starkt korroderande och löser upp koppar i en jämviktsreaktion, se reaktionsformel 2 (Herbert, personlig kontakt, 23 maj, 2011).



Bakterierna kan även skapa komplexbindande ämnen samt påverka syrehalten runt kapslarna. Dessa processer tillför en metabolisk och katalyserande dimension till förhållandena i berggrunden som gör det svårt att korrekt modellera fram vad som ska ske i framtiden (Pedersen, 2005). Det är också viktigt att välja material på kapseln så att bakteriell aktivitet inte ändrar på de reducerande förhållanden som råder i berggrunden och som antas skydda kapslarna (Åhäll, 2006). För djupa borrhål verkar bakterierna spela en mindre roll på grund av den höga salthalten samt att kapslarna inte fyller lika viktig funktion som för KBS-3.

---

<sup>13</sup> Kluster av bakterier som tillsammans bildar en skyddande yta.

## 5 HYDROGEOLOGI

Det är viktigt att ha god kännedom om de hydrologiska förhållandena på den plats där slutförvaret av använt kärnbränsle placeras. Detta är något som gäller vare sig valet är att deponera det använda kärnbränslet på 500 eller 5000 m djup. Hur vattnet beter sig beror på många olika faktorer såsom spricksystem, potentialskillnader och kemisk sammansättning. Den höga salthalten, på 3-5 km djup, är tillsammans med den sprickfattiga berggrunden den viktigaste barriären för konceptet djupa borrhål då dessa begränsar grundvattnets cirkulation. Vattnets rörelse är av intresse att känna till för att kunna förutse hur radionuklider skulle spridas vid eventuellt läckage.

### 5.1 NUKLIDTRANSPORT

Nuklidtransport kan innebära att radionuklider sprids till biosfären vilket medför en stor risk för levande organismer. Vid förvar av använt kärnbränsle i berggrunden utgör transport av radionuklider via vatten en av de största riskerna. Transporten kan ske genom advektion, diffusion, sorption och kolloidaltransport. Beroende på förhållandena på platsen och typen av radionuklid kommer olika transportprocesser dominera.

#### 5.1.1 Advektion

Advektion innebär att lösta ämnen transporteras med strömmande vatten eller gas och är den transportprocess som har störst betydelse för förflyttning av radionuklider över längre sträckor. Hur stor inverkan advektion har på radionuklidtransporten beror till största delen på berget och begränsas av den hydrauliska konduktiviteten, hydrauliska gradienten, porositeten och sprickmönstret (SKI 95:97). Vattnets densitet verkar också begränsande på vattenflödet, se avsnitt [5.3.1 Salthalt](#).

#### 5.1.2 Diffusion

Över kortare sträckor är det diffusion som är den dominerande transportprocessen. Diffusion är den viktigaste processen i stillastående eller långsamt strömmande vatten då denna syftar till en koncentrationsutjämning av exempelvis radionuklider. Diffusion kan ytterligare fördröja en transport till biosfären genom så kallad matrisdiffusion. Matrisdiffusion innebär att radionuklider diffunderar in i bergets porer och därmed avskiljs från det normala flödet. Detta kan även leda till att radionukliderna stannar helt i en avgränsad spricka (SKB-Fud10). På 3-5 km djup råder en kemiskt reducerande miljö i grundvattnet. Detta hämmar lösligheten och därmed spridningen av radionuklider eftersom dessa måste vara lösta i vattnet för att kunna nyttja denna transportväg (Åhäll, 2011).

#### 5.1.3 Sorption

Matrisdiffusion är tillsammans med sorption de två viktigaste retentionsprocesserna<sup>14</sup> för radionuklidtransporten i geosfären (SKB-Fud10). Sorption innebär att radionuklider

---

<sup>14</sup> Fördröjningsprocesserna.

fastnar på spricksystemets ytor. Genom reaktioner med bergmineralens negativt laddade ytor kan positivt laddade radionuklider bilda ytkomplex (SKB, 2009). Denna process gynnas av den höga temperatur och det höga tryck som förväntas råda på 3-5 km djup (Åhäll, 2007).

### 5.1.4 Kolloidaltransport

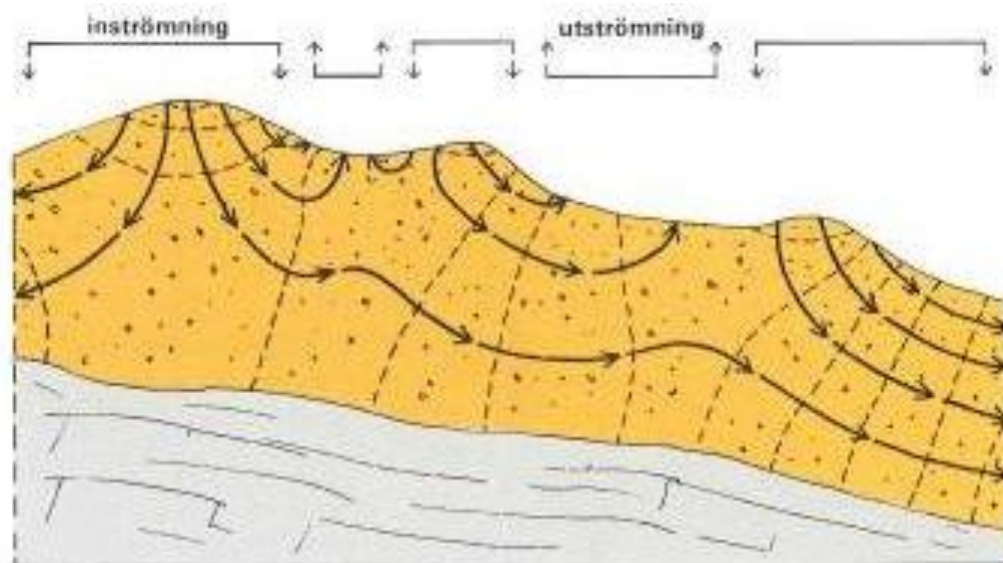
Kolloidala partiklar består av till exempel ler-, kisel- eller järnhydroxidpartiklar och har en diameter mellan  $10^{-3}$ - $10^{-6}$  mm i diameter (García, 2010), vilket medför att de inte sedimenterar i stillastående vatten. Radionuklider kan adsorberas till kolloidala partiklar och transporteras vidare med dessa. Koncentrationen av kolloidala partiklar på dessa djup begränsas av höga salthalter (Brady m.fl., 2009).

## 5.2 GRUNDVATTENFLÖDE I BERGGRUND

Grundvattnets flödesriktning styrs av skillnader i mekanisk-, kemisk- och termisk energi och begränsas i berggrunden till sprickor. Även sprickornas karaktär påverkar grundvattnets flödesriktning (Roxburgh, 1987).

### 5.2.1 Mekaniska energins inverkan på grundvattenflödet

Ett grundläggande begrepp när grundvattenströmning beaktas är potentialer. Generellt flödar vatten i riktning från hög till låg potential. Potentialen är ett mått på grundvattnets innehåll av mekanisk energi på en viss plats. Förenklat kan denna beräknas genom att addera tryckpotential och lägespotential vilket motsvarar vattnets tryck respektive djup i förhållande till en referensnivå, förslagsvis grundvattenytan (Hendriks, 2010), se figur 4. Då trycket är hydrostatiskt betyder det att vattnet är i jämvikt. Detta medför att inget flöde sker orsakat av potentialskillnader. Det hydrostatiska trycket ökar med djupet (Miffin, 2002).

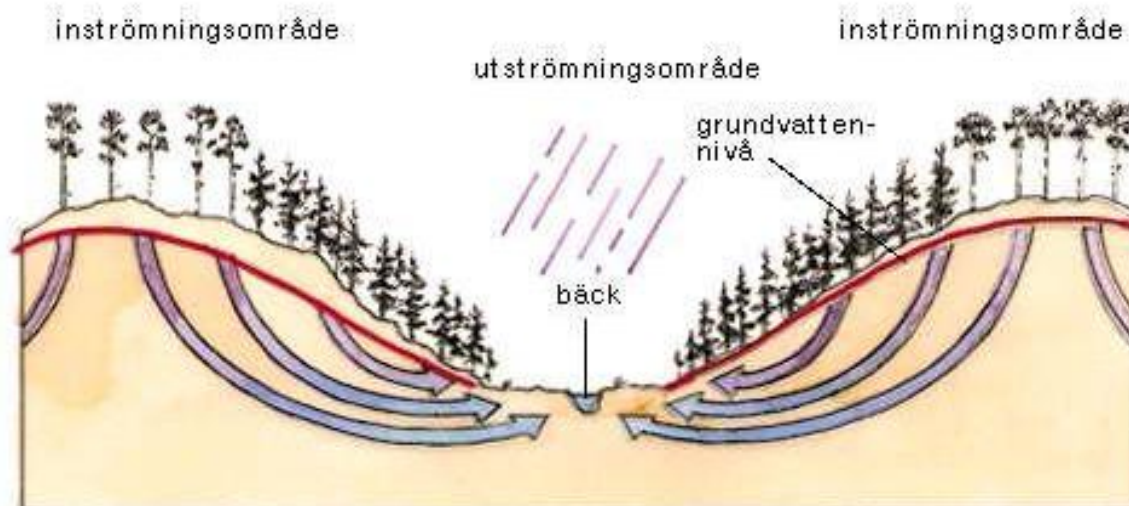


Figur 4. De streckade linjerna markerar den beräknade totalpotentialen och de heldragna linjerna anger strömningen för grundvattnet. Strömninglinjerna är vinkelräta mot totalpotentialen (Grip & Rodhe, 2009, s.70, med tillstånd).

Då det till stor del är tryckskillnader som driver grundvattenströmningen är det väsentligt att vätskestrycket i slutförvarets närliggande område är relativt konstant (Grundfelt, 2010). Det finns ett begränsat antal mätningar på vätskestrycket i porerna för större bergdjup. De mätningar som finns tyder dock på ett nästintill hydrostatiskt tryck med undantag för Kolahalvön. Där har ett 40-50% högre tryck uppmätts i vissa sprickzoner mellan 1 och 2,8 km (SKB, 2000). Ett tryck som överstiger det hydrostatiska kan leda till hydrofracturing, vilket bland annat kan skapas av att vätskan utvidgas på grund av värme, se avsnitt 8.4 Bergsspänningar (Brady m.fl., 2009).

### 5.2.2 In- och utströmningsområden

Eftersom radionuklider sönderfaller och blir mindre radioaktiva med tiden skulle ett långsamt vattenflöde och en lång transportsträcka vara gynnsamt. Hur lång tid det tar för infiltrerat grundvatten att strömma till markytan beror till viss del på om vattnet befinner sig i ett in- eller utströmningsområde. Ett inströmningsområde är ett område i terrängen där det sker en påfyllning av grundvattnet genom perkolation<sup>15</sup> av nederbörd. Från ett inströmningsområde rinner sedan vattnet vidare till ett utströmningsområde där grundvattenytan ligger ovanför, i höjd med eller strax under markytan, se figur 5. I Sveriges moränlandskap följs i stort sett grundvatten- och markytan åt, vilket medför att grundvatten flödar från höga till låga punkter i landskapet (Nationalencyklopedin, 2011). I Sverige är även bäckar och andra vattendrag utströmningsområden.



Figur 5. Illustration av in- och utströmningsområde (efter Nationalencyklopedin, 2011).

Genom att placera ett slutförvar nära ett inströmningsområde är det möjligt att förlänga nuklidernas uppehåll i marken med flera tusentals år. Inom ett område som tillsynes är ett inströmningsområde kan lokala sprickzoner och variationer i topografin förekomma så att en del av området får liknande egenskaper som ett utströmningsområde (Voss & Provost, 2001).

<sup>15</sup> Grundvattenbildning.

### 5.2.3 Djupförvar i in- och utströmningsområden

Toth och Sheng formulerade år 1994 en teori som de kallar "The Recharge Area Concept", vars fördelar de sammanfattade år 1996. Senare tolkades detta av Voss och Provost (2001). Enligt Voss och Provost har föroreningar som infiltreras i marken inom ett inströmningsområde längre flödesväg. Tiden det tar för dem att nå markytan igen (returtiden) blir således längre än om föroreningarna infiltreras i ett utströmningsområde, även om de ligger i samma grundvattenprofil. Fördelarna med att anlägga slutförvaret i ett inströmningsområde beror även till stor del på att många beräkningar blir förenklade då flödet ofta är nedåtriktat samt att returtiden och andra parametrar är mindre känsliga i ett inströmningsområde.

Det är många faktorer som ska tas med i beräkningarna när det kommer till att välja en lämplig plats för ett slutförvar av använt kärnbränsle. I första hand ska berggrunden i området vara lämplig gällande få vattenförande sprickor, stabilitet med mera. I området där slutförvaret placeras ska det gärna finnas befintlig infrastruktur. Hänsyn måste även tas till olika lagar och föreskrifter som kan gälla i området, till exempel om området är naturskyddat. Sveriges kommuner har dessutom rätt att säga nej till att ett slutförvar för använt kärnbränsle byggs inom deras gränser (Birgersson, personlig kontakt, 13 maj, 2011).

När det gäller placering nära kusten eller i inlandet har SKB analyserat och studerat strömningsförhållanden inom båda landskapstyperna men inte kunnat påvisa några systematiska skillnader. Det är i stället lokala förhållanden, och då främst berggrundens hydrauliska konduktivitet, som avgör om ett område är lämpligt med avseende på grundvattenströmningar (Birgersson, personlig kontakt, 13 maj, 2011).

I princip kan det vara fördelaktigt att placera ett framtida slutförvar inom ett inströmningsområde. Men de undersökningar och analyser SKB gjort, i rapport R-10-43, visar att det är lokala flödesmönster, styrda av lokala förhållanden, som är avgörande för enskilda platsers lämplighet med avseende på grundvattenströmning (Birgersson, personlig kontakt, 18 maj, 2011).

Topografin anses vara en faktor som bidrar till grundvattenströmningens djup och den är därmed viktig att ta hänsyn till i valet av plats för slutförvar. Det blir betydande skillnader i potential där topografin omfattar stora lokala höjdskillnader. Potentialskillnaden skulle i dessa fall kunna bidra till djupare grundvattenflöden (Hendriks, 2010).

Pryce publicerade 1986 en rapport i vilken han undersökt grundvattenflöden ner till 5 km djup. I den fann han ett möjligt samband mellan det undersökta områdets omkringliggande topografi och grundvattenströmningarna i berget (Roxburgh, 1987). Flera rapporter bekräftar detta, däribland SKB:s rapport TR98-05. Där redogörs att ett flackt landskap bidrar till en dominerande grundvattencirkulation inom den översta

kilometern vilket bidrar till att underliggande grundvatten blir mer stillastående. En region med lokalt stora höjdskillnader bidrar dock till djupare grundvattenströmningar i och med att vatten på grund av större potentialskillnader då kan perkolera djupare. En kuperad topografi bidrar till att den aktiva grundvattencirkulationen blir mer djupgående vilket i sin tur påverkar saltsprånget att uppstå på ett större djup, se avsnitt [4.1.1 Geologiska modeller ner till 5 km djup](#). Detta saltsprång är i största grad betydande för resonemanget kring djupa borrhål som slutförvar, se avsnitt [5.3.1 Salthalt](#) (Juhlin m.fl., 1998).

Sammanfattat borde djupa borrhål gynnas av att placeras i ett flackt landskap. Detta skapar ytligare grundvattencirkulation och därmed ett ytligare saltsprång. Dessa egenskaper bidrar till små flöden på djupet samt minskad risk för läckage till den övre grundvattenzonen och indirekt biosfären.

#### **5.2.4 Sprickornas betydelse för flödet i berggrunden**

I berggrunden styrs vattnets flödesvägar till stor del av sprickförekomst, spricköppningar samt sammanbindningar mellan öppna sprickor och sprickzoner. Som tidigare nämnts är vattentransport är den troligaste orsaken till att nuklider tar sig upp till biosfären, vid ett eventuellt nuklidläckage, är det för ett slutförvar viktigt att sprickorna i berggrunden har en begränsad möjlighet att leda vatten. Sprickornas egenskaper beskrivs till stor del av begreppen porositet och permeabilitet (Grundfelt, 2010).

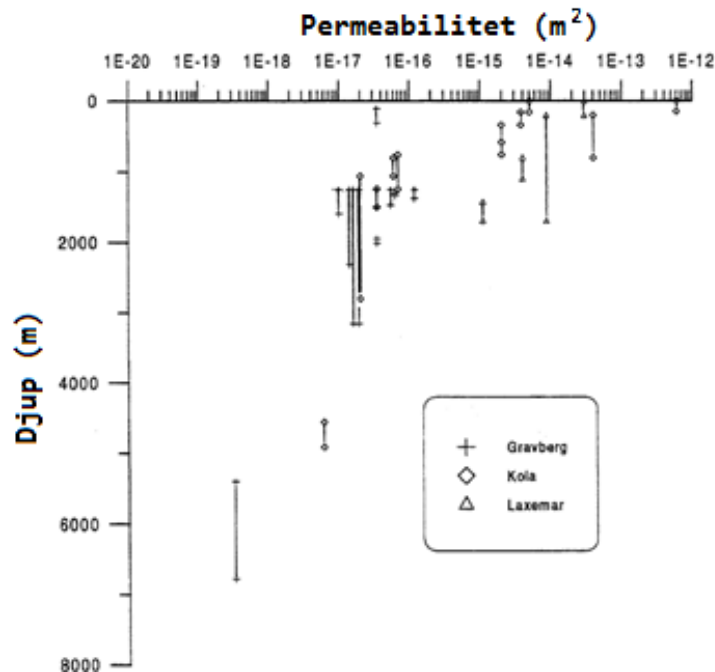
Porositeten beskriver hur stor volymandel av berggrunden som består av hålrum. En lägre porositet leder oftast till minskade flöden. Porositeten under 4 km djup sägs vara 10-40 gånger mindre än i en grusakvifär (Brady m.fl., 2009).

För att beskriva hur effektivt vattnet kan transporteras i spricksystemet talas det istället om permeabilitet. Permeabiliteten är beroende av porositet och sammanbindningar mellan sprickor. Många forskare är överens om att permeabiliteten minskar med djupet. Detta beror delvis på att sprickigheten på större djup minskar på grund av det höga trycket som förekommer där (Åhäll, 2006).

I kristallint berg varierar permeabilitet mellan  $10^{-16}$ - $10^{-20}$  m<sup>2</sup> under 4 km djup medan permeabiliteten i det ytligare berget är tio storleksordningar högre (Brady m.fl., 2009). Den låga permeabiliteten kan bidra till nästintill stagnanta grundvattenförhållanden på djup mellan 3 och 5 km. Detta är troligen en medverkande faktor till att nuklider transporteras långsammare vid ett läckage. Dock måste förekomsten av sprickzoner undersökas på den specifika platsen då dessa kan ha lokalt stor betydelse för grundvattenströmningen (Åhäll, 2006).

Liknande resultat ses i undersökningar från flera ställen i den baltiska skölden. I figur 6 ses permeabilitetsdata från Gravberg, Kolahalvön och Laxemar. Endast ett fåtal mätningar finns på större djup (Juhlin m.fl.,1998). I denna rapport har valet gjorts att

inte extrapolera permeabilitetsdata då detta kan vara missvisande på grund av brist på data.



Figur 6. Permeabilitetsdata från Gravberg-1, Kolahalvön och Laxemar (efter Juhlin m.fl., 1998, s. 66).

### 5.2.5 Den termiska energins inverkan på grundvattenflödet

Den största drivkraften för vätskeflöde och migration av radionukleider från borrhålet tros komma från den värmeutveckling som orsakas av kapseln (Brady m.fl. 2009). Den förhöjda temperaturen bidrar till en förhöjd vätsketemperatur och ökat vätsketryck. Det finns en tvådimensionell modell som visar på att temperaturgradienten kommer bidra till ett ökat grundvattenflöde under de första 1000 åren (Zyvoloski, Robinson m.fl., 1997, citerat av Brady m.fl., 2009). Beräkningar som genomförts visade att denna värmeutveckling skapar en maximal förflyttning av grundvattnet 60-70 m i vertikal riktning uppåt om avståndet mellan borrhålen är minst 200 m (Claesson, Hellström och Probert, 1992, samt Marsic m.fl., 2006, citerat av Grundfelt, 2010). Troligen ökar flödet främst via vägen med högst permeabilitet, alltså den längs foderröret, se avsnitt 6.1.2 Fodring (Brady m.fl., 2009).

Dock har modeller visat att flödet inte förväntas bli tillräckligt stort för att störa den naturliga saltbarriären, alltså densitetsskillnaden, se avsnitt 4.3 Temperatur.

### 5.2.6 Beräkningar och modeller

I de flesta modeller för flöden i sprickigt berg utgår man från så kallade icke-kontinuitet- och kontinuitetsmodeller. Icke-kontinuitetsmodeller utnyttjas i sprickfattigt berg och då vissa enskilda sprickor är av större betydelse. Flödet,  $Q$ , beräknas då enligt ekvation 4:

$$Q = \frac{2}{3} \left[ \frac{(P_0 - P_d) d_B^3 d_w}{\nu d_L} \right], \quad (4)$$

där  $P_0$  är trycket i sprickans öppning,  $P_d$  är trycket i utmynningen,  $d_B$  är sprickans halva bredd,  $d_w$  är längden av sprickan vinkelrätt mot flödesriktningen,  $\nu$  är viskositeten,  $d_L$  är sprickans längd och  $\frac{(P_0 - P_d)}{d_L}$  är därmed totalpotentialskillnaden (Roxburgh, 1987).

Då det i berget finns områden med relativt jämn porositet, permeabilitet och tryck kan dock approximationer utföras och kontinuitetsmodeller utnyttjas. Vanligtvis utförs då extrapolation av porositet, potentialer och hydraulisk konduktivitet över en större volym. Detta medför att Darcy's lag kan användas för att ta fram flödet. Darcy's lag definieras enligt ekvation 5:

$$Q = -KA \frac{(P_0 - P_d)}{d_L}, \quad (5)$$

där  $K$  är den hydrauliska konduktiviteten och  $A$  motsvarar volymens tvärsnittsarea. Det finns dock en del begränsningar med metoden då den endast kan utnyttjas vid laminärt flöde<sup>16</sup> vilket oftast är fallet för stora djup. Detta medför i princip att Darcy's lag inte kan utnyttjas i sprickor där flödet blir turbulent (Roxburgh, 1987).

Ett exempel på en framtagna hydrogeologisk modell finns i rapporten från Juhlin m.fl. 1998. Denna är grundad på de mätningar som finns inom den baltiska skölden samt data från platser med liknande kristallin berggrund, se avsnitt 4.1.1 Geologiska modeller ner till 5 km djup. Viktigt att poängtera är att det saknas tillräckligt med data för att kunna dra riktiga slutsatser från resultatet. Dock fås i denna, och liknande modeller, vissa indikatorer på de trender som finns (Juhlin m.fl., 1998).

## 5.3 KEMISK SAMMANSÄTTNING

### 5.3.1 Salthalt

Grundvattnets salthalt är av stor betydelse för vattnets flödesmönster. Vanligtvis sker en ytlig cirkulation i den översta kilometern och nedanför finns ett saltsprång under vilket salthalten är betydligt högre. Salthalten ökar delvis på grund av att vattnet hinner interagera under längre tid med jord och berggrund ju djupare vattnet perkolerar (Juhlin m.fl., 1998). De saltkällor som finns i berget är främst vittring och urlakning av mineral men saltet kan även hörröra från infiltrerande havsvatten och frysning, se figur 7 (SKB, 2009). Vattnets flödes hastighet är av stor betydelse för hur snabbt och mycket salthalten ökar. En långsam flödes hastighet medför att det blir längre interaktionstid mellan vattnet och berget, vilket bidrar till större mängder lösta salter och därigenom högre salthalt med djupet (Juhlin m.fl., 1998).

Istider tros kunna påverka de hydrologiska förhållandena i berggrunden, se även avsnitt 4.5 Istider. Detta beror delvis på att enorma mängder sötvatten frigörs då isen smälter och skulle i teorin kunna ha en utspädande effekt på det salta grundvattnet på

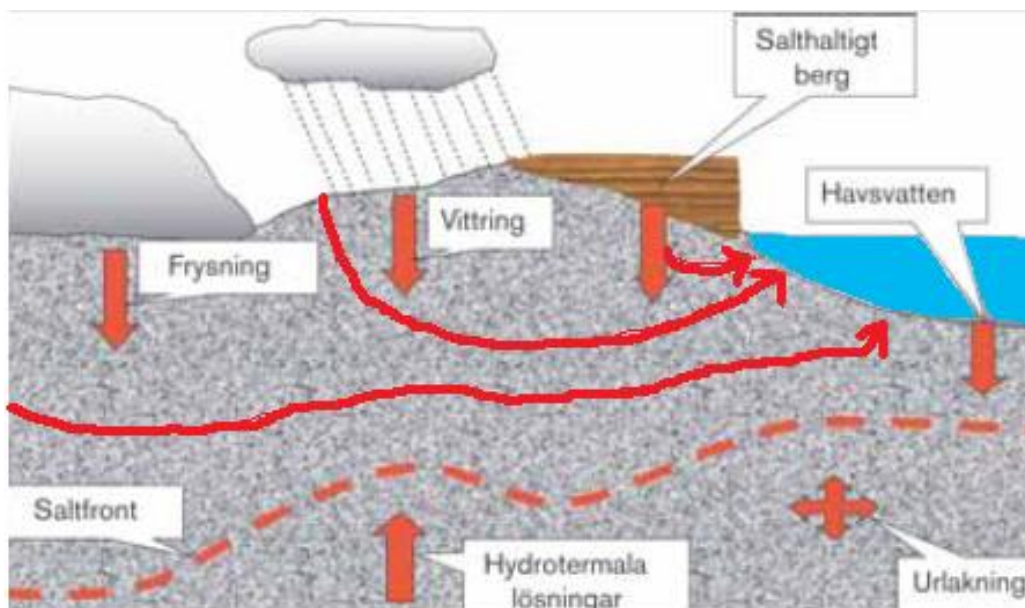
---

<sup>16</sup> Icke-turbulent flöde.



3-5 km djup. Modelleringar visar att salthalten minskat efter den senaste istiden. Dock anses det att salthalten delvis har kunnat ersättas av infiltration från havet, i kustnära områden (SKB, 2009). Samtidigt har mätdata från Äspölaboratoriet antytt att de senaste istiderna inte haft betydande inverkan på densitetsgradient. Detta då det går att undersöka om vattnet varit i kontakt med biosfären med hjälp av isotopdata. Isotopdata från Äspölaboratoriet visar tecken på att det djupa grundvattnet varit nästintill stagnant trots perioder med nedisningar (Louvat, Michelot & Aranyossy, 1999). På lång sikt kan saltvattenbarriären även påverkas av jordskalv (Grundfelt, 2010), se även avsnitt 4.5.3 Jordbävningar.

Den högre salthalten ökar vattnets densitet. En bild av berggrunden i profil visar att det på grund av densitetsskillnaden uppkommer två strömningszoner, se figur 7. Vattenutbytet mellan dessa är begränsat. Detta medför troligen att radionuklider från ett läckage på flera kilometers djup till stor del kommer stanna i den undre strömningszonen och därmed kommer transporten upp till biosfären fördröjas. Densitetsgradient är därmed den viktigaste faktorn till att konceptet djupa borrhål utreds som alternativt slutförvar för använt kärnbränsle.



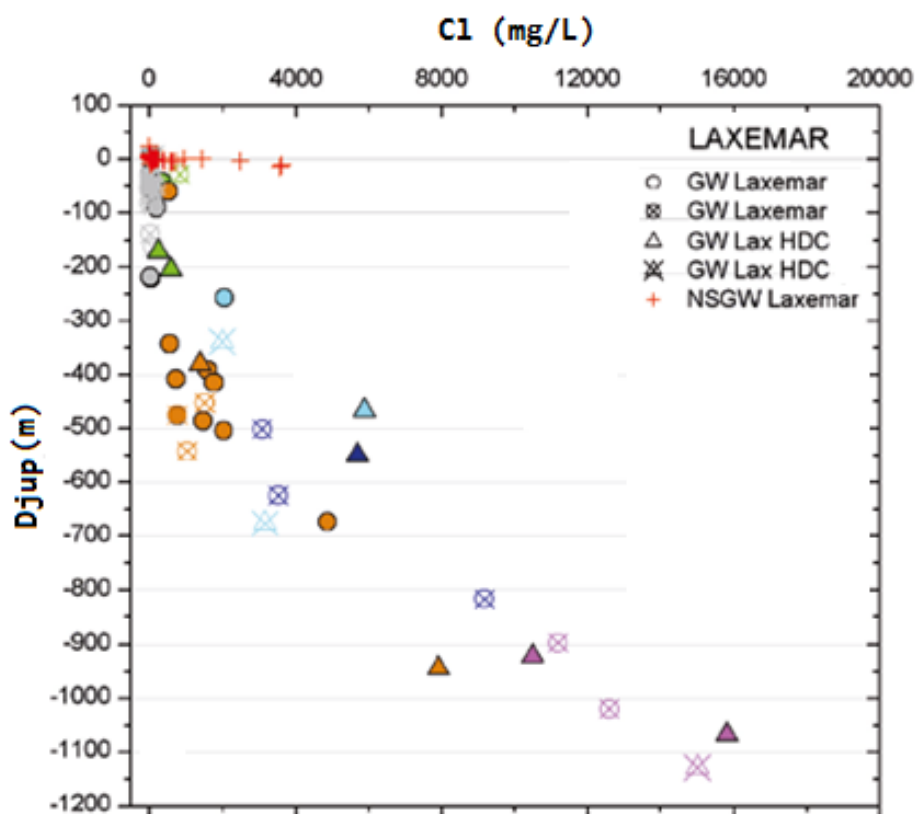
Figur 7. Schematisk bild över de möjliga saltkällorna och saltsprångets lokalisering. I zonen ovanför saltfronten sker ett aktivt grundvattenflöde medan förhållandena under är mer konstanta (efter SKB, 2009, s. 50).

Det finns ingen klar definition på hur hög saltkoncentrationen vid saltsprånget är, men den ligger generellt kring några gram per liter på 500 m djup och ökar till några tiotals gram per liter på några kilometers djup. Dock är salthalten beroende av en mängd faktorer och kan variera starkt från plats till plats (Birgersson, personlig kontakt, 2011-05-18). Salthalten kan dock stiga över 100 g/L i vissa områden, exempel på det finns i

den kanadensiska skölden<sup>17</sup> (Juhlin m.fl., 1998). Det använda kärnbränslet bör placeras på tillräckligt stort avstånd från saltsprångets övre gräns för att minska risken för nuklidläckage till den mer turbulenta grundvattenzonen (Åhäll, 2011).

Djupet till saltsprånget är delvis beroende av topografin vid ytan, se avsnitt 5.2.3 Djupförvar i in- och utströmningsområden. Vid borrhålet Gravberg-1 är terrängen kuperad och platsundersökningar visar att saltsprånget ligger så djup som kring 5 km (Juhlin m.fl., 1998). För att inte behöva borra lika djupt är troligen ett flackt landskap att föredra.

Genom att exempelvis undersöka kloridhalten fås en indikation på hur salthalten betar sig då djupet ökar, se figur 8. I figuren ses en tydlig trend på ökande salthalt kring 1 km djup. Detta tyder med stor sannolikhet på att salthalten är ännu högre på 3-5 km djup. Extrapolation har dock inte utförts då det anses finnas brist på data på större djup och extrapolation skulle därmed kunna bli missvisande.



Figur 8. Data på kloridhalten från mätningar i borrhål i Laxemar- Simpevarpområdet (efter Gimeno, Auqué, Gómez & Acero, 2009, s.14).

<sup>17</sup>Den kanadensiska skölden breder ut sig över östra, centrala och nordvästra Kanada men omfattar även norra Minnesota, Wisconsin, Michigan och New York i USA (Encyclopedia Britannica, 2011).

### 5.3.2 pH

Vattnets pH påverkar lösligheten av flertalet ämnen och är därför en faktor som kan vara värd att undersöka då nuklidtransport modelleras. Vattnets pH är beroende av vattnets temperatur och kemiska sammansättning. Generellt medför en ökande temperatur ett minskande pH-värde (Roxborough, 1987). Men viktigare är oftast förekomsten av kalkrika mineral såsom kalцит. Sådana mineral är bidragande till ökande pH-värden i grundvattnet (SKB, 2009). Vissa buffertar är känsliga för högt pH, exempelvis klarar inte bentonit pH över 11, se avsnitt [6.5 Buffert](#) (Grundfelt, 2011).

### 5.3.3 Gassammansättning

Förekomsten av vissa lösta gaser kan ha inverkan på hur väl det använda kärnbränslet kan förvaras på djupet. Vatten med hög syrehalt kan orsaka korrosion av bentonit och en eventuell kapsel, vilket i sin tur kan bidra till ett nuklidläckage i längden. Normalt innehåller inte berggrunden på 500 m något syre vilket rimligen kan ge vissa indikationer om att det är än mindre sannolikhet för syreförekomst på större djup (SKB, 2009). Lösta gaser kan även ha en effekt på själva borrhningen och kan bidra med viktig information när det gäller analys av vattnets ursprung samt hur länge det funnits på platsen (Juhlin m.fl., 1998). Det finns även en pågående debatt angående vätgaspåverkan, se avsnitt [9.2.3 Material](#).

## 6 TEKNIK

I konceptet djupa borrhål finns det många svåra tekniska aspekter, många som idag inte passerat idéstadiet. För att kunna avgöra om metoden är ett alternativ krävs en djupare insikt i de tekniska perspektiven. Vilka tekniska lösningar bör användas och hur ska det genomföras? Vidare är det viktigt att skilja på om tekniken och lösningarna redan finns idag eller om forskning krävs.

### 6.1 BORRNING

Att borra djupt är något som har gjorts åtskilliga gånger, det djupaste hål som borrats är ungefär 12 km djupt på Kolahalvön. Nyligen borrades ett borrhål, KTB, till ett djup av 9 km i södra Tyskland för att undersöka berget (Bram, Draxel, Hirschmann, Zoth, Hiron & Kühr, 1995).

Att borra hål med stor diameter är något som görs dagligen, framförallt i byggnation av vägtunnlar genom berg. Svårigheten är att det inte går att borra djupt med den teknik som nyttjas för breda borrhål, eller alternativt borra stora diametrar med tekniken som används för djuphålsborrning. Således går det inte att med dagens teknik både borra mycket djupt och samtidigt ha stor diameter på borrhålen.

Dagens teknik för djuphålsborrning är i första hand utvecklad av oljebolagen, då de har ett intresse i att kunna borra djupt med stor precision. Det är inom detta område som den stora marknaden för borrhålsutveckling finns. När djupa borrhål görs i undersökningssyfte, som till exempel KTB-borrhålet, används ofta en variant av oljebolagens teknik. Problemet är att kunna överföra denna teknik till slutförvarbygget eftersom denna teknik är till för mycket mindre dimensioner än vad som behövs till ett slutförvar (Beswick, 2008).

#### 6.1.1 Borrteknik

Det finns olika varianter av borrteknik på marknaden idag. De två främsta teknikerna är användningen av en roterande- eller hamrande borkärna. Det finns även andra metoder under utveckling, exempelvis en metod där berget värms upp av en laser för att bilda sprickor samt en metod där det används mycket starka syror för att fräta sönder berget.

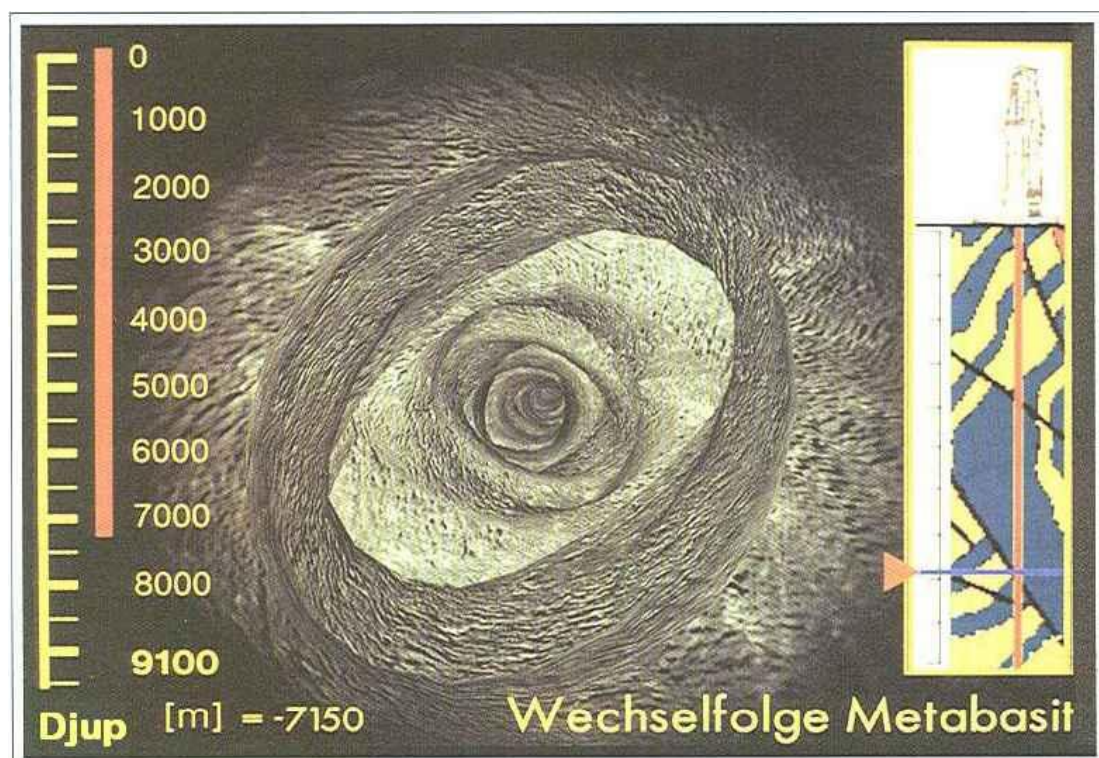
Skillnader mellan borrtekniker kan vara intressant att känna till då olika metoder lämpar sig bättre för olika områden. Den roterande borkärnan drivs av borrhålsmotorn och den hamrande kärnan drivs av exempelvis luft. Luften pressas ned genom ett rör under mycket högt tryck för att driva borkärnan, för att sedan stiga upp till ytan igen genom borrhålet (Beswick, 2008).

Hammarborrar kräver stora mängder luft för att borra. Vid ett grunt borrhål i Pennsylvania, USA, borrades det till ett djup av 1,2 km. Startdiametern var 991 mm och den slutliga diametern var 620 mm. För detta krävdes mer än  $6 \text{ m}^3$  luft/sekund för att

driva hammarborren. En nackdel med hammarborring är att det kan vara svårt att transportera bort borrhax<sup>18</sup> om man stöter på större mängd vatten. Detta för att luften som trycks ner då inte klarar detta, vilket leder till att man inte kan fortsätta borra. En viktig aspekt med djupa och breda borrhål är att bland annat mycket stora volymer borrhålsvätska måste hanteras både i hålet och vid ytan för att bibehålla rätt tryck i botten på hålet (Beswick, 2008).

Både hammar- och roterande borrhålsborrar kräver att borrhålsvätskan kyls med någon typ av vätska. Ofta används vatten blandat med bentonitlera eftersom denna mix även tar med borrhaxet från botten av hålet. Vätskan används alltså som både transportmedium för borrhaxet och för att kyla ner borren. För att kunna återanvända vätskan krävs att den renas från borrhaxet. Borrhålsvätskan fungerar även stabiliserande då den motverkar att hålet deformeras av bergsspänningar samt att bergutfall sker (Beswick, 2008).

Trots borrhålsvätskan kan bergutfall ändå ske. Detta är kanske det största problemet med borring av djupa borrhål. Om stora mängder sten faller ut finns utöver risken för instabilitet även risken att borren förstörs. I vissa fall har man blivit tvungen att överge hål och borra nytt då stabiliteten blivit för dålig. Figur 9 visar detta problem i det tyska KTB-borrhålet. Bilden är tagen på 7150 m djup. Här ses att väggarna är synbart ovala efter att sten har fallit ner och hålet tryckts ihop av bergets spänningar (Beswick, 2008).

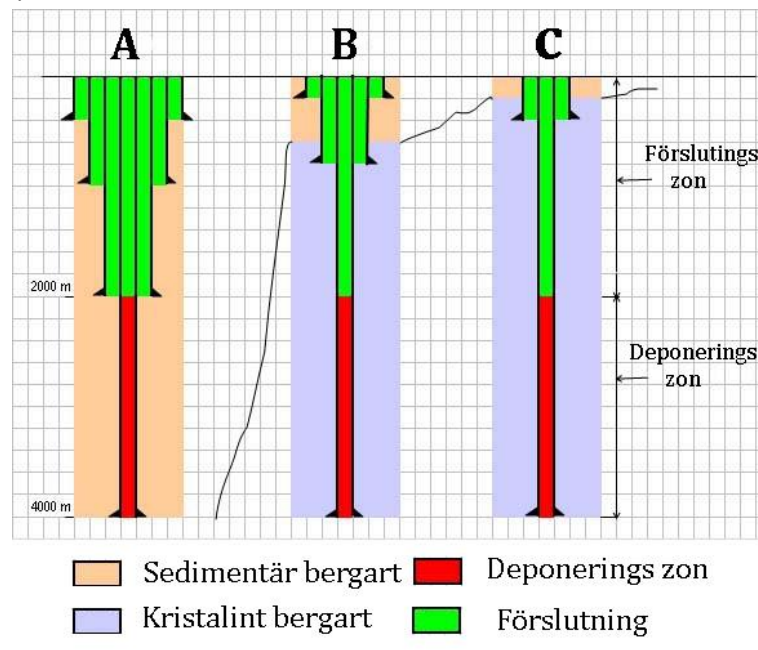


Figur 9. KTB-borrhålet i Tyskland, bilden är tagen på 7150 m djup (efter Beswick, 2008, s20).

<sup>18</sup> Samlingsnamn för de fina partiklar som blir kvar efter att borring gjorts i berg.

## 6.1.2 Fodring

För att undvika att borrhål blir instabila och deformationerade bör foderrör<sup>19</sup> installeras. Olika typer av berg faller ut och trycks ihop olika mycket, vilket påverkar behovet av foderrör. En sedimentär bergart kräver flera lager av foderrör för att stabilisera hålet under tiden borrning sker, medan ett kristallint berg oftast inte behöver foderrör under själva borrarprocessen, se figur 10. Vid val av plats för ett slutförvar är inte borrarprocessen ett primärt problem, det går att borra djupt i båda nämnda berggrunder (Beswick, 2008).



Figur 10. Tre schematiska skissar på varianter på hur foderrör används beroende på vilken typ av berggrund som borrar i. Som syns i bilden krävs fler omgångar med foderrör vid sedimentär bergart än kristallint. Således krävs en större diameter i A än i B för att få samma diameter nere i deponeringszonen. (efter Beswick, 2008, s.22 ).

Givet problematiken med deformation av borrhål krävs att foderrör används genom hela hålet för att kunna deponera kapslarna med hög säkerhet utan att de fastnar. Fodringen går till så att det först borrar ett stort hål i vilket ett foderrör gjuts fast, sedan fortsätter borrarprocessen med mindre diameter på hålet. Förloppet upprepas tills önskad djup nåtts. Hur många gånger processen upprepas beror på vilken typ av berggrund det borrar i. På grund av detta måste hålet ha en större diameter i mynningen för att önskad diameter ska erhållas i botten (Beswick, 2008).

Det råder stora svårigheter i att utforma ett foderrör som inte är för tungt för att kunna föras ned men som samtidigt klarar av bergets spänningar. Perforerade och gallerformade foderrör har diskuterats, en fördel med detta är att rörets vikt reduceras avsevärt. Dock återstår oklarheter tillvida dessa typer av foderrör kan göras tillräckligt starka (Grundfelt, 2010). Perforerade rör skulle även kunna underlätta problemet med att täta utrymmet mellan foderrör och bergvägg (Harrison, 2000), se avsnitt 6.6 Förslutning.

<sup>19</sup> Rör som stoppas ner i borrhålet för att motverka bergutfall och deformation.

### 6.1.3 Borrriggar

Dagens borrar är utvecklade för oljeindustrin och majoriteten av undersökningshål som gjorts i vetenskapligt syfte har nyttjat dessa. Om foderrör med en diameter upp till 500 mm nyttjas kan standardutrustning från oljeindustrin användas. Vid storlekar på upp mot 1000 mm i diameter krävs att riggen klarar att lyfta över 2000 ton på grund av foderrörens tyngd (Harrison, 2000). Riggar med denna förmåga finns inte på marknaden idag. I exemplet som nämns tidigare om hammarborring i USA användes en "National 1320 UE, dieseldriven elektrisk 2000 Hk<sup>20</sup> rigg". Detta borrhål hade stor diameter men var inte speciellt djupt. KTB borrades med hjälp av en specialbyggd rigg. Den är världens hittills största rigg till land med en kraft på 12 900 Hk (Harrison, 2000). Trots denna kapacitet lyfte riggen inte mer än 1000 ton. Därför krävs det ytterligare specialutveckling av riggar för att kunna hantera tyngden och kraften som krävs för att hantera de stora borrarerna och foderrören.

I tabell 1 sammanställer Beswick (2008) olika standarddiametrar på borrhål och foderrör. De vita områdena i tabellen representerar vilka storlekar på hål som idag är möjliga att göra och som faktiskt har genomförts. De ljusgrå fälten visar vad som troligen skulle kunna fungera med utveckling av dagens teknik. Det som idag inte är möjligt att genomföra är markerat med mörkgrå (Beswick, 2008).

**Tabell 1. Sammanställning av olika standarddiametrar på borrhål och foderrör. YD står för ytterdiameter och ID innerdiameter. De vita områdena är möjliga att borra idag, de ljusgrå anses vara möjligt om utveckling sker och de mörkgrå omöjligt idag. Ex. För att borra ett borrhål som är 4000 m djupt och har en slutgiltig innerdiameter på foderröret på 500 mm tittar man först i den andra sektionen, på 4000 m djup och i kolumnen med borrhålets diameter. För att erhålla detta hål krävs att borrarbörjan börjar med en diameter på 1220 mm och kommer då på 4000 m djup ha en diameter på 660 mm. Foderröret kommer således ha en innerdiameter på 508 mm (efter Beswick, 2008, s48).**

Djup [m]	Borrhålets diameter [mm]	Foderrör YD [mm]	Foderrör ID [mm]
<b>300 mm diameter foderrör</b>			
50	914	762	686
1000	660	508	473
4000	445	340	<b><u>307</u></b>
<b>500 mm diameter foderrör</b>			
50	1220	1016	927
1000	914	762	673
4000	660	559	<b><u>508</u></b>
<b>750 mm diameter foderrör</b>			
500	1905	1625	1524
1000	1422	1168	1067
4000	1016	863	<b><u>775</u></b>
<b>1000 mm diameter foderrör</b>			
500	3048	2670	2540
1000	2133	1776	1676
4000	1524	1219	<b><u>1118</u></b>

<sup>20</sup> Hk är förkortningen på hästkraft, ett vanligt mått för styrkan på en maskin.

### 6.1.4 Tidsåtgång för borrar

Det är svårt att bestämma tidsåtgången för ett borrhål av större diameter. För att få en uppfattning går det att titta på liknande projekt. I Gravberg-1 tog det 100 dagar att nå 4 km (311 mm diameter) och 175 dagar för att nå 5 km djup (216 mm diameter). För KTB-borrhålet tog det 220 dagar till ett djup av 3 km (445 mm diameter) och 350 dagar för att nå 4 km (375 mm diameter). Utifrån detta kan det konstateras att tiden för borrar ökar exponentiellt med djupet. Beswick (2008) har sammanställt en tabell för att få en uppfattning av tidsåtgången för olika storlekar på borrhål i kristallint berg, se tabell 2. Tabellen visar hur lång tid det tar att komma ner på 4 km djup. Att fortsätta borra ner till 5 km skulle ta ungefär 30-50% längre tid.

Tabell 2. Uppskattade tider för att borra olika diametrar till 4 km djup (efter Beswick, 2008, s. 54).

Färdigt hål, diameter [mm]	Penetrationshastighet [m/hr]	Antal dagar
1000	1,00	500
750	2,50	200
500	3,75	135
300	5,00	100

Vidare måste oförutsedda faktorer beaktas i tidsplaneringen. Borren kan exempelvis fastna och försök att åtgärda detta måste då genomföras. Kunskap och erfarenhet av liknande problem finns bland de som jobbar med borrar idag. Dessutom kommer kunskaperna att öka under tiden projektet pågår. På grund av detta kommer de första hålen som borrar ta avsevärt mycket längre tid än de senare. För ett slutförvar i djupa borrhål krävs många hål och kunskapen kommer hela tiden öka vilket kan generera ett mer tidseffektivt arbete.

Kostnaden för ett sådant projekt är mycket svårt att uppskatta, vissa försök har dock gjorts. Kostnaden för ett enstaka hål blir mycket högre än ett projekt med flera hål, räknat per hål. Borrigen kan exempelvis flyttas efter första hålet för att användas till nästa. Amerikanska beräkningar har gjorts och SKB har gjort beräkningar här i Sverige. Sverige planerar att försluta 12 000 ton använt kärnbränsle och beräkningar som gjorts i USA gäller 109 000 ton. USA:s hela projekt beräknas i första steget kosta 71 miljarder USD (Brady m.fl., 2009). En liknande överslagsräkning har gjorts av SKB till 44 miljarder SKR (Grundfelt, 2010). Per ton använt kärnbränsle ger detta ungefär samma kostnad.

## 6.2 KAPSEL

Betydelsen av kapseln och dess utformning för slutförvar av använt kärnbränsle i djupa borrhål har diskuterats. I konceptet djupa borrhål utgör berget och grundvattnets saltsprång de huvudsakliga barriärerna för att förhindra läckage. Därmed menar vissa att vikten av kapseln som barriär är av mindre betydelse och att dess huvudfunktion är att möjliggöra samt förhindra läckage vid deponering (Grundfelt, 2010). Dock ställer Kärntekniklagen krav på ett flerbarriärsystem vilket kan tolkas som att kapseln ska fungera som barriär. Forskningen är begränsad på hur kända ingenjörsmaterial



reagerar på den hårda miljön som råder på deponeringsdjupet 3-5 km. Därmed finns det idag inget självklart val av kapselmaterial och dimensionering för denna typ av slutförvar (Grundfelt, 2010).

### 6.2.1 Specifikationer och krav

Krav på hur kapseln ska utformas har utarbetats av SKB utifrån internationella avtal och svensk lagstiftning. Tillverkningen av kapseln måste ske under kontrollerade former där valda specifikationer följs med stor noggrannhet. Utöver att helt innesluta det använda kärnbränslet samt vara tät vid deponering måste kapseln kunna hanteras på ett säkert sätt. Kapseln ska därmed klara av de mekaniska belastningar som uppkommer vid deponering. Valet av material och dimensioner får inte ha en negativ effekt på övriga barriärers säkerhetsfunktioner. På lång sikt ska den även klara av de påfrestningar som förväntas uppkomma på förvaret (Grundfelt & Wiborgh, 2006).

Det råder svårigheter att borra ett hål som överstiger 500 mm i diameter i nedre delen av hålet, dessa begränsningar inom borrhållningen sätter ett övre krav på kapselns dimensioner. För tekniska detaljer se avsnitt [6.1.1 Borrhållning](#). Detta medför att kapselns diameter är den viktigaste designparameter då denna styr storleken av borrhålet.

### 6.2.2 Storlek och dimension av kapseln

Kapselns dimension påverkar antalet hål som krävs för att rymma det använda kärnbränslet. Med andra ord kan en större kapsel inhysa mer kärnbränsle vilket reducerar antalet borrhål emedan det försvårar den borrhållningstekniska aspekten. Av detta skäl blir valet av kapsel ett optimeringsproblem mellan teknisk möjlig bredd av borrhålet mot antal kapslar. Vidare är storleken på det använda kärnbränslet av betydelse för kapselns dimensionering.

I Sverige används två typer av kärnreaktorer, vilka ger bränsleelement med olika dimensioner. I tabell 3 anges de bränsleelement av störst storlek, det finns även bränsletyper av något mindre dimension. Detta tas dock inte hänsyn till då dessa inte är styrande av kapselns utformning (SKB, 2006).

Tabell 3. Sammanställning av de olika bränsleelementens dimensioner (efter SKB, 2006, s. 36.).

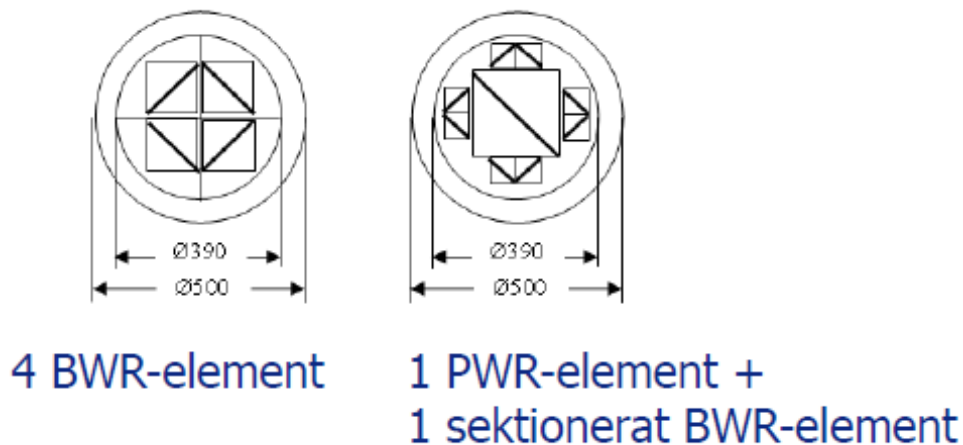
Typ av bränsle	Längd [mm]	Tvärsnittsarea [mm <sup>2</sup> ]
BWR	4 398	140x140
PWR	4 243	214x214

Ett bränsleelement innehåller de bränslestavar som används i kärnreaktorn. Det finns två alternativ för inkapsling, antingen behålls bränsleelementet intakt eller så plockas bränslestavarna ut från elementet, så kallat konsolidering (Grundfelt, 2010). Genom att använda det senare alternativet kan volymsandel bränsle i respektive kapsel maximeras. Detta medför att kapslar med mindre dimensioner kan utformas, vilket är positivt i borrhållningsteknisk mening.

Vid konsolidering får bränslestavarna däremot inte placeras för tätt i kapseln, då det finns risk att en nukleär kedjereaktion uppstår. Det anses möjligt att packa 70-80 % av kapselns volym med använt kärnbränsle. Detta måste dock ske under förutsättning att den totala mängden bränsle i kapseln understiger de tillåtna mängderna för ett bränsleelement (Gibb, McTaggart, Travis, Burley & Hesketh, 2007).

En nackdel med konsolidering av bränslet är att detta medför ytterligare hanteringsprocesser med tillhörande säkerhetsrisk. Det krävs även att själva bränsleelementen måste deponeras separat (Grundfelt, 2010).

Oavsett konsoliderad form eller inte bör kapslarna ha tillräcklig längd för att undvika att bränslestavarna måste kapas. För icke-konsoliderat bränsle har ett antal dimensioner på kapslar förts fram. En svensk kapselmodell med en ytterdiameter om 500 mm och en innerdiameter om 390 mm, rymmer antingen 4 BWR-element eller 1 PWR-element och ett sektionerat BWR-element, se figur 11.



Figur 11. Översiktlig skiss av ett förslag på kapselutformning som antingen rymmer 4 BWR-element eller ett sektionerat BWR-element (Juhlin & Sandstedt, 1989, s. 77, med tillstånd).

Beroende på val av säkerhetsmarginal mellan kapsel och berg kan en kapsel kräva ett borrhål med en diameter upptill 800 mm, vilket är borrhållstekniskt svårt att åstadkomma (Grundfelt & Wiborgh, 2006). En annan modell, föreslår en kapsel med en inre diameter om 318 mm och en yttre om 340 mm. Denna skulle rymma 1 PWR element eller med marginal 1 BWR element (Hoag, 2005). En sådan kapsel skulle under samma premisser som för den svenska modellen ovan resultera i ett borrhål som endast kräver en diameter om 640 mm. Däremot finns risk att betydligt fler borrhål krävs till följd av fler kapslar.

### 6.2.3 Material

Kapselmaterialet ska klara av stora påfrestningar såsom högt tryck, hög temperatur och hög salthalt under och efter deponeringen. Den viktigaste aspekten gällande kapseln är att den håller helt tätt under deponeringen, detta för att om kapseln repas

eller skadas vid deponeringen innebär det risk för läckage. Ett läckage vid ett grunt djup, i samband med deponeringen, kan medföra en radioaktiv spridning i grundvattenzonen och därmed i biosfären, se avsnitt [5.1 Nuklidtransport](#).

Enligt Peter Szakálos (personlig kontakt, 18 maj, 2011) har ingen systematiskt utvärderat olika metaller och legeringar i en slutförvarsmiljö. Därmed råder stor osäkerhet för huruvida det finns någon metall som inte korroderas bort i sådan hög temperatur i kombination med hög salthalt under längre tid. När korrosion uppstår på en metall bildas bland annat metallhydroxider och vätgas. Om omgivningens tryck är lågt kan vätgasen bilda bubblor. Ett troligare scenario i ett djupförvar är att den största delen av vätgasen löser sig i vattnet, men en del går oundvikligen in i metallen. Om det sistnämnda sker kan de mekaniska egenskaperna och hållfastheten för metallen försämrans. Om mycket väte går in riskerar metallen att försprödas och spricka. Enligt Szakálos är risken liten för att det bildas så mycket vätgas att metallen spricker, men framhåller att hållfastheten mycket väl kan försämrans som resultat av korrosion.

Ädelmetaller såsom guld och platina är de enda metaller som med säkerhet kan hålla för förhållandena på deponeringsdjupet givet att de skyddas för slitage och repor. En lösning till den sistnämnda problematiken är ett yttre hölje av en mindre ädel metall för skydd mot de initiala mekaniska påfrestningarna. Andra möjliga kapselmaterial som förts fram är den halvädla metallen koppar. Szakálos menar dock att metallen saknar motståndskraft i rådande miljö och kommer med största säkerhet försvinna inom de närmsta 100 åren. Det finns andra metaller som kan klara sig bra, i första hand tantal<sup>21</sup> och kanske även palladiumlegerad titan. Den senare har eventuellt risk för väteförsprödning men det är ytterst osäkert om något av alternativen kan klara ett djupförvar i 100 000 år. Detta kräver omfattande forskning och ett motargument mot materialen är dess höga kostnad.

Det har diskuterats huruvida enklare stålkapslar skulle vara ett alternativ om kapslarna endast behöver hålla för deponering. Szakálos menar att stålkapslar visserligen kan korrodera sönder på några tiotals år, men kan vara ett kostnadseffektivt förslag om ett djupförvar inte är beroende av en metallkapsel som barriär. Ett problem som måste utredas med låglegerat stål är vätejämvtstrycket för järnkorrosion på givet djup. Vätgas i större mängder kan möjligen ha negativ effekt på andra aspekter hos slutförvaret. Den potentiella risken för detta menar Szakálos är något man bör utreda. Slutligen håller Szakálos öppet att keramiska material och eventuellt glasmaterial skulle vara ett mer korrosionståligt alternativ, men poängterar att det lätt spricker och går sönder.

I tidigare studier har olika material som bland annat titan, koppar och stål föreslagits som möjliga kandidater till kapselmaterial. Vidare har även olika förslag tagits fram vad

---

<sup>21</sup> Tantal är ett grundämne med atomnummer 73.

gäller fyllnadsmaterial<sup>22</sup>. I tabell 4 visas en sammanställning av kapselutformningar som diskuterats i tidigare studier på uppdrag av SKB (Grundfelt, 2010).

**Tabell 4. Sammanställning av tänkbara kapselmaterial gjorda i tidigare studier (Grundfelt, SKB, 2010, s.18, med tillstånd).**

Föreslagen i	Kapselbeskrivning	Preliminär utvärdering
/Juhlin och Sandstedt 1989/	Betongfylld titankapsel.	Av författarna rekommenderat alternativ.
	En solid kopparkapsel framställd med het isostatisk pressning (HIP) av kopparpulver.	HIP-processen är komplicerad då höga temperaturer och högt tryck krävs vid inkapsling. Vidare blir det svårt, om ens möjligt, att återta bränslet ur kapseln. /SKB 1992/
	En tunnare kopparkapsel med en inre cylinder av stål, liknande KBS-3-kapseln.	Den mindre diametern, i jämförelse med KBS-3-kapseln, bedöms dock ge upphov till hållfasthetsmässiga problem.
	En självbärande titankapsel utan fyllning eller inre stöd.	En titankapsel utan inre stöd måste göras av så tjockt gods att detta kapselalternativ blir ekonomiskt ointressant.
	En titankapsel, liknande den betongfyllda kapseln, men med en fyllning av bly.	En blyfylld kapsel ger varken tekniska, säkerhetsmässiga eller ekonomiska fördelar jämfört med en betongfylld kapsel. När bly stelnar minskar dess volym vilket skulle skapa tomrum i kapseln och reducera dess förmåga att mekaniskt motstå krafter från hantering och yttre övertryck.
Pass-studien /SKB 1992/	Kapslingar med alternativa fyllningar av glaskulor, blykulor och torrt cementpulver.	Ej utvärderade.
	Stålkapsel.	Betydligt kortare livslängd än en kopparkapsel. Vid korrosionen utvecklas vätgas som kan bidra till transport av grundvatten och radionuklider uppåt. En stålkapsel är dock inte med nödvändighet säkerhetsmässigt oacceptabel, eftersom förvarskonceptets primära säkerhetsfunktion ligger i fördröjning i berget
	Tunnare blyfylld stålkapsel.	Skulle kunna isolera bränslet längre än en ren stålkapsel.

Förutsatt att kapselns huvuduppgift endast är att förhindra läckage under själva deponeringsprocessen har det diskuterats att en enkel stålkapsel skulle räcka (Grundfelt, personlig kontakt, 11 maj, 2011). Ett sådant val skulle innebära en betydligt lägre kostnad för kapselns utformning jämfört med ett mer avancerat alternativ.

Genom att använda fyllnadsmaterial i kapseln, erhålls en ökad termisk konduktivitet samt en högre motståndskraft gentemot de tryckkrafter som uppstår i slutförvaret (Jensen & Driscoll, 2010). Däremot ökar fyllnadsmaterialet kapselns vikt vilket i sin tur ökar begränsningen på hur många kapslar som kan staplas på varandra.

Vidare får inte fyllningsmaterialet reagera med det zircaloy-lager<sup>23</sup> som omger bränslestavarna. Om skada uppstår på lagret finns risk att skadliga fissionsprodukter läcker ut. Därav krävs kunskap om hur fyllnadsmaterialet eventuellt kan reagera med zirkonium för att minimera riskerna vid kapseltillverkningen. Exempelvis har bly viss löslighet i zirkonium vid 330°C. Detta är den temperatur som blyet måste uppvärmas till för att smältas och därmed kunna användas som fyllnadsmaterial. Ytterligare problem som kan tänkas uppstå när en kapsel fylls med fyllnadsmaterial är att det kan ha uppstått

<sup>22</sup> Material som ska fylla tomrummet mellan bränslestavarna alternativt bränsleelementen i kapseln.

<sup>23</sup> Det zirkonimbaserade lager som omger bränslestavarnas uranpellets.

mikrosprickor i zircaloy-lagret under bränslestavarnas användning i kärnreaktorn. Vatten kan då ha trängt in i sprickorna vilket innebär att om kapseln fylls med material som är upphettat över 100°C så kan små gasexplosioner uppkomma. Detta kan skada zircaloy-lagret (Gibb m.fl., 2007).

### 6.3 DEPONERING

Ett annat viktigt delmoment för konceptet djupa borrhål är deponeringen av kapslarna. Den allmänna idén är att stapla kapslarna på varandra i deponeringszonen som går från 5 km till 2 km under markytan, se figur 14. Kapslarna kan föras ner en och en eller i paket om flera. Mellan varje kapsel/kapselpaket placeras ca 1 m tjocka bentonitblock (Juhlin & Sandstedt, 1989). Få detaljerade beskrivningar för hur detta ska gå till existerar. Den mest utförliga rapporten om deponering är gjord på uppdrag av SKB år 2000 (Harrison, 2000). Nyare forskning finns framförallt i en rapport från Storbritannien (Beswick, 2008).

Metoden i Harrisons rapport (2000) har tagits fram med hjälp av oljeborrningsbolaget Smith Red Baron som är specialister på att bygga borrhålsverktyg. Metoden är framtagen för stålkapslar med en längd av 4,2 m och diametern 500 mm. Dessa ska föras ner i ett borrhål på 4 km med en innerdiameter om 750 mm i deponeringszonen (Harrison, 2000). Innan deponering sker ersätts borrhålsvätskan med en deponeringsvätska, vanligtvis en bentonitslurry<sup>24</sup>. Kapslarna kommer därefter att föras ner genom bentonitslurryn. Detta innebär att densiteten inte får vara för hög då kapseln kan skadas av trycket. Bentonitslurryns främsta uppgift är att fungera som en buffert runt kapseln, se avsnitt [6.5 Buffert](#). För att distribuera denna jämt runt kapseln behöver kapslarna placeras centralt i hålet.

#### 6.3.1 Utrustning

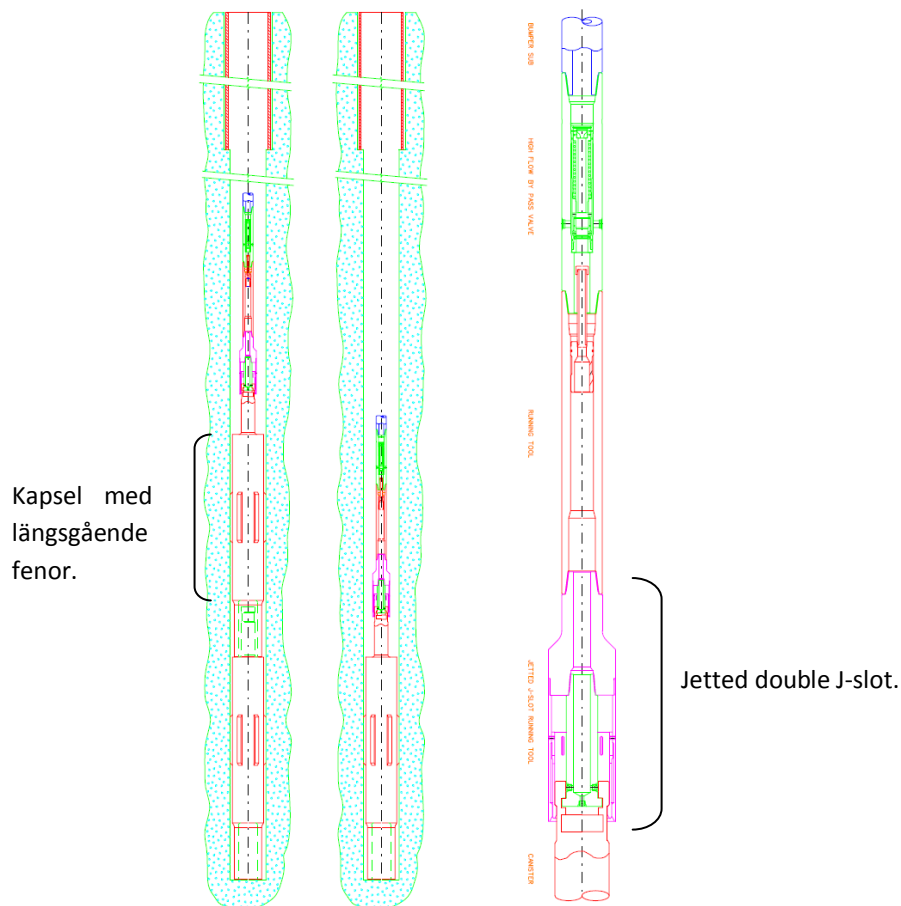
Smith Red Barons förslag på verktyg för deponering är av typen "jettted double J-slot" med en speciell bajonettinfattning där man använder tryck och vridning för att gripa tag och släppa kapseln, se figur 12. Verktyget sätts fast på samma borrhål som används för att borra hålen. För att förhindra att kapseln lossnar under deponeringen eller att det inte går att få loss kapseln när den är deponerad har verktyget ett backup-system. För att gripverktyget ska kunna ta tag i kapslarna krävs att det ovanpå kapslarna finns ett så kallat passtycke (Harrison, 2000).

För att säkerställa att kapseln hamnar centralt i hålet föreslås långsgående fenor mitt på kapseln, se figur 12. För att klara alla påfrestningar krävs att de är gjorda av ett slitstarkt material som till exempel Kevlar eller HDPE<sup>25</sup>. Hårdare material som till exempel metall skulle kunna göra att kapseln fastnar eller skadas (Harrison, 2000).

---

<sup>24</sup> Blandning av bentonit och vatten.

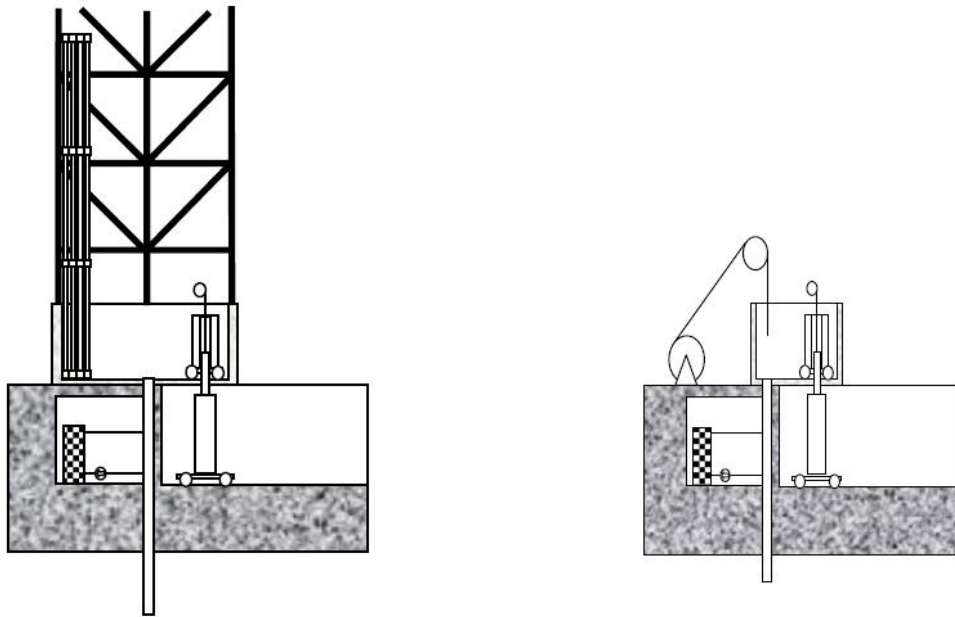
<sup>25</sup> Förkortning av högdensitets polyeten, som är en sorts plast.



Figur 12. Smith Red Barons ritningar av deponeringsverktyget syns till höger. Den vänstra bilden visar hur deponeringen av kapslar går till (efter Harrison, 2000, bilaga 3).

Till skillnad från Harrison (2000) har Beswick (2008) föreslagit att en separat rigg används för deponeringen. Denna rigg behöver inte vara lika stor som den för borrningen. En förenklad bild på de olika anläggningarna ses i figur 13. Beswick (2008) beskriver även en annan metod för deponeringen, så kallad coiled tubing<sup>26</sup>. Skillnaden från ovan nämnda metod är att man har ett sammanhängande rör uppvirad på en trumma i stället för rörsektioner. Coiled tubing finns i olika längder och diametrar. 2010 fanns upp till 6 km långa rör med en diameter upp till 92 mm (Grundfelt, 2010). Fördelen med coiled tubing är möjligheten att skicka elektriska signaler med hjälp av en inbyggd kabel samt att det går snabbare att föra upp och ner utrustningen.

<sup>26</sup> Svensk term saknas.



Figur 13. Den vänstra bilden visar en anläggning med borrhög och den högra med coiled tubing (Grundfelt, SKB, 2010, s. 36, med tillstånd).

Liksom Harrison (2000) anser Beswick (2008) att kapslarna behöver utformas med ett passstycke upptill för att ett verktyg ska kunna gripa tag i dem. Däremot ges inget förslag på utformningen av gripverktyget. Detta ges emellertid av Grundfelt (2010). Idén bakom verktyget kommer ursprungligen från demonstrationer av deponeringstekniken för KBS-3 i Äspölaboratoriet, men skulle gå att anpassa till metoden med coiled tubing. Verktyget styrs med hjälp av elektriska signaler som skickas till hydraulcylindrar eller motorer som öppnar och stänger griplorna.

### 6.3.2 Djupledspositionering

Under deponeringen är det mycket viktigt att kapselns position i djupled kan beräknas. Risken är annars att kapseln släpps för tidigt eller att borrhöret börjar pressa på kapseln när den nått botten. Med en borrhög för deponeringen som Harrison (2000) nämner, se avsnitt 6.1.3 *Borrhögar*, kan positionen i vertikalled beräknas med hjälp av att mäta längden för varje borrhög man använt. Denna metod ger en noggrannhet på 10 cm till ett djup av 4000 meter. Om hänsyn tas till töjningen av borrhöret från dess egen vikt samt bärkraften från bentonitslurryn kan noggrannheten förbättras.

Beswick (2008) vill lösa problemet genom att placera gammamarkörer i fodringsröret och en gammasensor i deponeringsutrustningen. Med hjälp av dessa kan noggranna mätningar av kapselns position under deponering göras. För denna metod är coiled tubing bäst lämpad. Datasamlingen från gammautrustningen kan sedan ske med hjälp av elektromagnetisk telemetri<sup>27</sup> som ofta används inom borrhögindustrin.

Grundfelt (2010) föreslår den mest enkla metoden för positionering genom att helt enkelt mäta när lyftkraften i deponeringsanordningen minskar. Problemet är att

<sup>27</sup> En trådlös överföring av mätdata genom optik eller radiovågor.

kapselns vikt, i förhållande till borrvejern, troligtvis kommer att vara för liten för att en tillräckligt noggrann mätning ska kunna utföras. Enligt Grundfelt (2010) anses töjningen av borrhörens dessutom vara svårare att förutspå än vad Harrison (2000) ger sken av. Töjningen beror dels på rörets vikt, värmen i berget samt bärkraften från bentonitslurryn. Om coiled tubing används blir beräkningarna enklare då töjningen, på grund av egenvikten, förväntas bli mindre. Grundfelt (2010) nämner även alternativet loggning, där foderrörskarvarna används som referens för kapselns position.

### 6.3.3 Tidsåtgång

Beswick (2008) uppskattar tiden för deponering av en kapsel till mellan tre och fyra dagar. Om coiled tubing används går det snabbare. Med hjälp av tidsbedömningar från SKB 1989 skulle det ta 10 månader att fylla ett hål från 4 km till 2 km med kapslar exklusive tiden för förseglingen (Beswick, 2008).

Grundfelt (2006) försöker göra en uppskattning av vilken hastighet deponeringen måste ha för att uppnå samma deponeringshastighet som KBS-3. Deponeringshastigheten med KBS-3 metoden är beräknad till 200 kapslar per år vilket skulle motsvara 600 kapslar per år i djupa borrhål då dessa innehåller färre bränsleelement. Detta innebär att två kapslar behöver deponeras samtidigt i två parallella hål med en hastighet på 5-10 cm per sekund om tvåskiftsarbetet tillämpas. 2010 skrev Grundfelt dock att det skulle krävas att tre kapslar fördes ned på en dag för att uppnå samma takt som för KBS-3 vid användning av borrhög. Fortfarande saknades väl underbyggd data för att göra noggranna beräkningar.

### 6.3.4 Risker

De problem som kan tänkas uppstå vid deponering är bland annat fel på deponeringsutrustningen samt att kapslar tappas, fastnar eller går sönder. Om något av problemen sker vid markytan och kräver en handgriplig åtgärd finns en ökad strålningsrisk. De flesta problemen tros emellertid kunna hanteras utan att personal utsätts för en ökad strålning. Går problemet ej att lösa behöver kapseln avskärmas så effektivt som möjligt. Störst problem blir det dock om kapseln går sönder eftersom radionuklider då kan spridas med luften (SKB, 2000).

Om en kapsel skulle tappas i hålet är chanserna goda att få tag på den igen då deponeringsvätskans densitet är så hög att kapseln sjunker mycket långsamt. Sannolikheten för att kapseln skadas under deponeringen är således mycket liten. Ett eventuellt problem för att få tag på kapseln igen är att den omgivande bentonitslurryn är väldigt hal (Grundfeldt, 2010). Så länge kapseln är hel går det att ordna ett strålningsskydd runt hålet så att man kan ta upp och laga kapseln. Om den inte är hel går det däremot inte att garantera ett totalt skydd mot strålningen vilket är mycket problematiskt. Vid ett eventuellt läckage innebär det även att den kontaminerade deponeringsvätskan måste bytas ut (SKB, 2000).



Någon bra lösning om en kapsel skulle fastna finns heller inte. Däremot anses det att ett bra infodrat hål minimerar riskerna för att något sådant ska kunna hända.

## 6.4 ÅTERUPPTAG

En annan fråga förknippad med slutförvar är om det skulle gå att ta upp avfallet igen och om det skulle vara ekonomiskt hållbart. Frågan är starkt förknippad med hur man betraktar det använda bränslet. Är det en resurs för framtida generationer eller är det avfall? I det svenska kärnavfallsprogrammet finns inga krav på återupptag. Däremot ser man det som en fördel om det går att ta upp kapslarna innan man försluter förvaret (Harrison, 2000).

För att det ens ska vara möjligt att återanvända bränslet krävs att det först upparbetas<sup>28</sup>. I Sverige sker ingen upparbetning idag och därför blir utvecklingen av kärnkraftsindustrin avgörande för om bränslet ska ses som en framtida resurs eller avfall. Kommer kärnkraften finnas kvar, vilken sorts reaktorer kommer användas och vilka upparbetningsmetoder kommer att finnas? Hur aktuellt ett återupptag blir beror även på tillgång och pris på uran, samt kostnaderna för ett återupptag. Idag är kostnaden för uran mycket låg men i framtiden är det troligt att priserna ökar (Kärnavfallsrådet, 2011).

I Harrisons rapport (2000) ges en metod för återupptag där samma utrustning som för deponeringen används. Grundfelt (2010) och Åhäll (2009) menar däremot att djupa borrhål inte kan konstrueras så att ett säkert återupptag möjliggörs.

## 6.5 BUFFERT

Ett flerbarriärsystem kräver att de deponerade kapslarna omges av en buffert. Bufferten ska hålla kapseln centrerad i hålet samt skydda kapseln mot yttre påverkan. Den ska även ha låg hydraulisk konduktivitet för att fördröja transporten av radionuklider. Krav ställs även på att dessa säkerhetsfunktioner upprätthålls under en längre tid samt att bufferten kan installeras med hög precision. Det ligger en utmaning i att hitta ett material som uppfyller dessa krav. Dels ska materialet uppfylla sina funktioner i rådande miljö under lång tid, dels vara möjligt att placera med hög tillförlitlighet.

### 6.5.1 Bentonitlera som buffert

Bentonitlera är det material som främst förts fram som möjlig buffert då den har egenskaper som kan uppfylla de ovan ställda kraven (Grundfelt, 2010). Vid kontakt med vatten sväller bentonitleran vilket ger hög densitet. Detta medför att bentonitleran verkar stabiliserande och får en låg hydraulisk konduktivitet vilket hämmar transporten av radionuklider. Dock kan de kemiska förhållanden som råder i deponeringszonen ha en negativ effekt på bentonitleran som buffert (SKB, 2002).

---

<sup>28</sup> Skilja ut och utnyttja oanvänt uran för att utvinna mer energi.

Bentonit är ett naturligt material som industriellt kan anpassas efter behov och därför måste det utvärderas vilka specifika egenskaperna ett slutförvar ställer på en buffert (Ola Karnland, personlig kontakt, 19 maj, 2011). En av bentonitens viktigaste beståndsdelar är montmorillonit, ett silikatmineral med betydande egenskaper för bentonitens funktion som buffert. Beroende på sammansättningen får bentoniten olika egenskaper, men densiteten är genomgående viktigast. Enligt Karnland skulle en bentonitlera innehållande 60-80 % montmorillonit i princip alltid fungera som buffert. Densiteten hos bentoniten i ett slutförvar är av stor betydelse för dess förmåga att motstå de yttre påfrestningar som kan verka negativt på dess buffertegenskaper. Undersökningar har visat att dessa egenskaper, både svälltryck och täthet, ökar exponentiellt med densiteten. En hög densitet är beroende av hur mycket bentonit som placerats i djupförvaret.

Det krävs att en buffert klarar av de höga salthalterna, 10-100 g/L, som råder i deponeringszonen. I dagsläget finns god kunskap om hur bentonit fungerar i hög salthalt under konstanta kemiska- och mineralogiska förhållanden. Under dessa förutsättningar kan salthalten bli mycket hög utan att det sker påverkan på bentonitens svällande egenskaper. Dock är det viktigt att bufferten har en hög densitet vid kontakt med mycket salt grundvatten för att behålla sin tätande förmåga (Ola Karnland, personlig kontakt, 19 maj, 2011).

Bakgrundstemperaturen hos ett djupt borrhål är ca 80°C, vilket stiger till ca 130°C efter att kapslarna deponerats, se avsnitt 4.3 Temperatur. Karnland anser att den höga temperaturen är mer problematisk än den höga salthalten för bentonitleran. Visserligen har man gjort undersökningar på hur bentoniten fungerar på högre temperaturer under begränsad tid, men Karnland menar att den specifika deponeringsplatsens kemiska egenskaper måste undersökas för att ge ett klart svar. Det höga hydrauliska trycket som finns på deponeringsdjupet förväntas inte ha någon negativ effekt på bentonitens buffertegenskaper.

Om stål väljs som kapselmateriale kommer bentoniten efter några år stå i direktkontakt med bränslestavarna. Karnland menar att radionuklidens påverkan på bentonit behöver utredas och är en viktig faktor att undersöka. Studier på detta kan ha utförts i länder där stålkapslar planeras att användas i slutförvaret. Han lämnar dock öppet för att radionukliderna kan orsaka pH-förändringar i grundvattnet. Väldigt låga- respektive väldigt höga pH-värden minskar bentonitlerans täthet. Även om bentoniten har en relativt hög buffrande kapacitet krävs en noggrann utvärdering av hur pH påverkas av utformningen av slutförvaret. Exempelvis bör man blanda betong och bentonit med försiktighet vid förslutningen då betongen har en starkt pH höjande effekt.

Det bör gå att framställa en bentonitbuffert för den extrema miljön i ett djupt borrhål men tekniken måste vidareutvecklas. Vidare anser Karnland att det går att använda

samma bentonitsammansättning både som buffert och förslutning. Det gäller bara att uppfylla specifikationerna för de mer extrema delarna.

### **6.5.2 Alternativt buffertmaterial**

Som ett alternativ till bentonitlera som buffert har en blybaserad legering diskuterats. Legeringen tillförs i fast form och sedimenterar genom bentonitslurryn. Med tiden smälter hettan, från kapslarna, legeringen som då fyller ut och tätar kvarvarande sprickor. När kapslarna med tiden kyls stelnar legeringen. Detta leder till att kapseln får ett skydd mot mekaniskt tryck från omgivande bergvägg samt ovan placerade kapslar. Ett problem är att hitta ämnen som tillsammans med bly ger rätt smältpunkt samt att legeringen får rätt densitet (Gibb m.fl., 2007). Ett annat problem är att kapslarna fortfarande kan skadas under tiden legeringen smälter och stelnar.

### **6.5.3 Deponering av buffert**

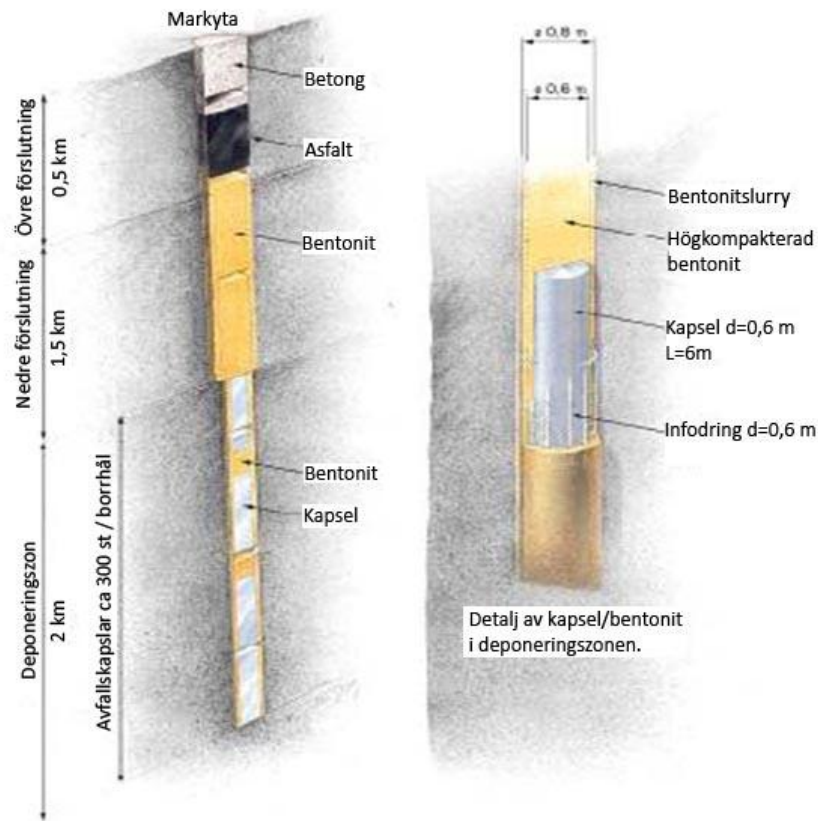
Som tidigare nämnts finns ett förslag att den nedre delen av borrhålet fylls med en deponeringsvätska, bentonitslurry, innan deponeringen av kapslar sker. Mellan varje kapselpaket förs ca 1 meter tjocka block av kompakterad bentonitlera ner (Brady m.fl. 2009). Med tiden kommer blocken att suga åt sig vatten från bentonitslurryn och en homogen massa med ett konstant tryck och täthet bildas. Utbytet av borrhålsvätska till deponeringsvätska kan ske genom att deponeringsvätskan pumpas ner i hålet via borrhöret innan en kapsel deponeras (Harrison, 2000). Ett annat förslag är att bentonitslurryn förs ner till den nedre delen av hålet i en behållare varefter den pressas ut (Grundfelt, 2010). I den senare metoden kan bentonitslurryn ha en högre densitet än i den första. Densiteter mellan  $1,5 \text{ g/cm}^3$  och  $1,75 \text{ g/cm}^3$  har föreslagits. Deponeringsvätskan med den lägre densiteten skulle eventuellt kunna fungera både som borrhålsvätska och buffert (Grundfelt, 2010).

En situation som uppstår när kapslarna staplas på varandra är att underliggande kapslar utsätts för en tryckkraft. Kapslarnas förmåga att motstå detta beror dels på densitet och vikt hos respektive kapsel, samt hur många kapslar som placeras över varandra. Vidare är motståndskraften beroende på vilka säkerhetsmarginaler som väljs mellan kapseln och foderröret. En liten marginal ger en starkare motståndskraft då extra stöd fås från foderrörets väggar. Dock gäller det motsatta förhållandet vad gäller säker deponering av kapslarna, en stor marginal minskar risken för att kapseln fastnar under deponeringen (Gibb m.fl., 2007). För att minska tryckkrafterna kan bärande pluggar eller murbruk användas mellan kapslarna.

## **6.6 FÖRSLUTNING AV BORRHÅLET**

Efter deponeringen av kapslarna krävs att hålet försluts. Detta för att förhindra tillträde till de deponerade kapslarna, att vatten kommer ner i deponeringszonen samt spridning av radionuklider. Den metod flest förespråkar kommer ursprungligen från

Juhlin och Sandstedt 1989 samt PASS-studien 1992 och innebär att borrhålet delas in i olika zoner som kan ses i figur 14 (Grundfelt, 2010; Grundfelt & Wiborgh 2006).



Figur 14. Schematisk bild över de tre deponeringszonerna där bentonitlera, asfalt och cement är tänkta som förslutningsmaterial (Grundfelt, SKB, 2010, s.17, med tillstånd).

Ovanför deponeringszonen vid 2 km djup börjar förslutningszonen. Den delas in i en övre- och nedre zon, varav den senare fylls på samma sätt som deponeringszonen. Den övre zonen fylls med asfalt mellan 500-250 m djup och de översta 250 m fylls därefter med betong (Brady m.fl., 2009; Grundfelt, 2010; Grundfelt & Wiborgh, 2006).

Både betong och asfalt är material med låg permeabilitet, vilket är nödvändigt för att förhindra att vatten och radionuklider kan cirkulera. Studier som gjorts i USA för WIPP<sup>29</sup> har visat att permeabiliteten för asfalt ligger på högst  $10^{-18}$  m<sup>2</sup> och mellan  $2 \times 10^{-21}$ - $10^{-17}$  m<sup>2</sup> för betong. Asfalt är dessutom ett bra materialval då det är vattentätt, vidhäftande, formbart och hållbart. Så länge asfalten är skyddad från solljus och oxidation kan den behållas intakt i 10 000-tals år, vilket naturliga asfaltansamlingar i berggrunden bevisat. Motståndskraften mot syror, baser och salter är även den god hos asfalt (Brady m.fl., 2008). Fördelarna med betong är att det är ett lättanvänt material som historiskt sett visat sig mycket bra vid konstruktionsarbeten. Betong kan krympa när den torkar, vilket medför risk att hålrum mellan berg och betong uppstår.

<sup>29</sup> Waste Isolation Pilot Plan, ett geologiskt slutförvar för radioaktivt avfall i USA.

Transportmotståndet i den översta delen av hålet förväntas därför bli relativt låg (Grundfelt & Wiborgh, 2006).

Återkristalliserad krossad granit har förts fram som alternativt förslutningsmaterial. Graniten hettas upp till 700°C och därefter får den långsamt kylas av under kontrollerade former. I en stor del av förslutningszonen skulle krossad granit kunna varvas med så kallade värmeelement och resultatet skulle bli en förslutning lika tät som bergrunden. Det råder vissa oklarheter hur sådana värmeelement skulle fungera men metoden kan kanske möjliggöras av framtida teknik. Om så är fallet är återkristallisering ett tänkbart alternativ för förslutning av borrhålet (Gibb m.fl., 2007).

En del av problematiken med konceptet djupa borrhåll är att helt fylla utrymmet mellan berget och foderröret. Fylls inte utrymmet helt fås en möjlig kanal där radionuklider via vattnet kan komma upp till områden där en större cirkulation förekommer, se även avsnitt 5.1 Nuklidtransport. En kanal anses ha nästintill obegränsad permeabilitet vilket betyder fri passage för radionukliderna (Juhlin, personlig kontakt, 15 april, 2011). Flera varianter på lösningar finns beroende på vilken typ av foderrör som använts. Om ett permanent- eller cementerat foderrör installerats föreslås att delar av foderröret i den nedre förslutningszonen tas bort. Detta skulle göra att direktkontakt mellan berg och bentonitlera skapas (Juhlin & Sandstedt 1989; Brady m.fl., 2009). Alternativt installeras ingen permanent infodring i den nedre förslutningszonen eller så används ett perforerat foderrör som låter bentonitleran svälla ut till utrymmet mellan röret och berget (Harrison 2000).

## 7 DISKUSSION

### 7.1 SVAR PÅ FRÅGESTÄLLNINGAR

Diskussionen om djupa borrhål som ett alternativt slutförvar av använt kärnbränsle sker här utifrån de frågeställningar som sattes upp i rapportens början, se avsnitt 2 Syfte och frågeställning. Varje fråga byggs på de krav som finns för ett slutförvar.

- Vilka barriärer är planerade att användas och hur kompletterar de varandra?

Konceptet djupa borrhål baseras på att berget är beständigt över lång tid samt att saltsprånget är stabilt, dessa ses som förvarets huvudbarriär. Kapslarnas hållbarhet är främst av betydelse under deponeringen medan buffertens centrala uppgift är att stabilisera kapslarna samt förhindra att dessa kollapsar på grund av mekaniska krafter. Både kapslarna och bufferten förväntas brytas ner med tiden på grund av de extrema förhållandena som råder på djupet 3-5 km. I berget kan radionukliderna enbart spridas via vattenfyllda sprickor. Saltsprånget kompletterar med sin höga densitet och låga cirkulation, vilket motverkar spridning av radionuklider till biosfären. Detta kan tolkas som att kravet på ett flerbarriärssystem inte uppfylls då det krävs att berget och saltsprånget samverkar för att erbjuda ett fullgott skydd.

Huruvida ett flerbarriärssystem anses vara bättre gentemot en beständig barriär kvarstår och är diskuterbart. Enligt en av djupa borrhåls förespråkare, Gibb, betonas att urberget funnits i flera miljoner år och de ingenjörsmässiga lösningarna enbart funnits i några decennier.

- Hur djupt kan man borra med dagens teknik och är det tillräckligt precist för att genomföra djupa borrhål som slutförvar av kärnavfall?

Idag går det inte att borra till de djup som krävs för konceptet djupa borrhål i kombination med de dimensioner som efterfrågas. Däremot har smalare borrhål ner till ca 9 km djup borrats bland annat i Tyskland. Med rimliga förväntningar på den tekniska utvecklingen för borrhållsteknik under de kommande 20 åren borde det i framtiden vara möjligt att borra ett hål som uppfyller ställda krav.

Idag finns i princip ingen marknad för denna typ av borrhåll vilket hämmar utvecklingstakten. Därmed krävs särskild forskning för att utvecklingen av borrhållsteknik ska ske, liknande det som SKB har gjort för KBS-3 metoden. Detta behöver nödvändigtvis inte ske i Sverige utan kan inhämtas från andra länder som forskar på området.

Precisionen som måste tillhandahållas vid borrhåll finns redan idag, avvikelser från lodlinjen vid grundare hål är nästan obefintliga. Dock blir det allt svårare att hålla sig till lodlinjen vid större djup. Exakt när avvikelser från lodlinjen uppstår är olika för respektive borrhål, men inträffar ofta på djup ner mot 4-5 km. Den svenska

berggrunden är förhållandevis lämplig för djupa borrhål. Berggrunden är hård men svår att borra i. Fördelen är dock att hålen blir mer stabila och att det går att borra djupare innan foderrör behöver installeras.

Kapselns material är enligt forskare relativt oväsentligt för djupa borrhål. Oberoende av materialet kommer kapseln förstöras på grund av de aggressiva förutsättningarna nere på 3-5 km djup. Kapseln är istället viktig under deponeringen, kanske framförallt för att skydda de som arbetar med det använda kärnbränslet samt förhindra läckage vid ett grunt djup. Hur kapslarna ska deponeras är oklart och är något som måste utvecklas. Idag finns inte en klar metod för deponering. Olika idéer på hur det kan lösas finns men dessa ligger alla på ritbordet. Förslutningen av borrhålen är också på idéstadiet och kräver utveckling.

- Vilka säkerhetsaspekter finns kring deponering och upptag av kärnbränslet?

Det finns en omfattande problematik kring tekniken när det gäller deponering och upptag av kapslar. För deponering finns inga garantier i något moment rörande kapslarna. Röret kan deformeras och kapslarna fastna. I dagsläget finns ingen konkret lösning på hur en sådan situation ska hanteras. Utveckling krävs och trots detta kommer deponeringen troligen ändå utgöra en av de svåraste tekniska aspekterna. Vidare behöver foderrörens material, dimension och utformning undersökas ytterligare.

- Vilken typ av underhåll krävs efter borrhålens förslutning?

Utformningen av djupa borrhål som slutförvar kommer vara sådan att övervakning ej krävs. Vidare kommer troligen kontroll och eventuella reparationer av slutförvaret att vara tekniskt omöjliga.

En av de största invändningarna mot djupa borrhål är att återupptag av det använda kärnbränslet i dagsläget skulle vara för kostsamt, komplicerat och tekniskt svårt. Detta kan vara till metodens nackdel då dagens avfall kan bli framtidens resurs. Till detta måste tilläggas att ett återupptag inte är syftet och att detta inte krävs utifrån svensk lag. Viktigt att beakta är även att det nedgrävda kärnbränslet möjligen kan användas för ny energi men samtidigt är en resurs för kärnvapenindustrin.

- Hur lång tid räknas djupa borrhål kunna förhindra läckage av radioaktiva ämnen till omgivningen?

Kapseln och bufferten kommer med största sannolikhet inte hålla i de 100 000 år som krävs av ett slutförvar. Metodens grundidé är dock inte att kapseln och bufferten ska fungera som slutliga barriärer utan att berget och vattnets densitetsgradient skall vara den huvudsakliga barriären mot nuklidtransport upp till biosfären. Det är däremot mycket osäkert vad som kommer ske vid en istid. Vid en eventuell läcka finns det inga konkreta

metoder för att hantera utsläppet. Nukliderna bör dock inte kunna transporteras upp till ytan under det tidsspann som de är farliga.

Det finns delade uppfattningar utifall man ska varna kommande generationer för förvaret eller dölja förvaret ordentligt. Ifall information ska lämnas, hur ska det då gå till? Problematiken måste utredas noggrant men utredningen fortgår redan för andra slutförvarsmetoder. För djupa borrhål kan det däremot vara så att det inte krävs samma typ av information eftersom det använda bränslet blir mer otillgängligt. Kapslarna kommer troligen att tryckas sönder och brytas ner, detta gör att det verkar omöjligt att få upp kärnbränslet igen efter en längre tid.

- Hur kommer djupa borrhål att påverkas av miljöförändringar såsom istid och jordbävningar?

Exakt när en framtida glaciation kommer inträffa kan inte förutspås. Dock är det med möjligt att konstatera att Skandinavien kommer vara under is någon eller flera gånger under den tid då slutförvaret måste hållas isolerat. Massan av en kommande inlandsis kommer att trycka hela jordskorpan vertikalt nedåt och därför förväntas borrhålen förbli intakta. Isens tyngd väntas också göra berget stabilare. Under nedisningen minskar frekvensen av jordskalv, men lämningar från den senaste istiden visar att skalven ökar i mängd och storlek då iskanten drar sig tillbaka. Sådana postglaciala skalv pågår än idag längs Norrlandskusten. Det är oklart hur slutförvaret påverkas av ett jordskalv. SKB har beräknat en sannolikhet för skada om slutförvaret skulle bli i form av KBS-3. Men eftersom bland annat kapselmateriell och förslutningsmaterial för djupa borrhål inte ännu fastställts, kan inte en sådan riskanalys kalkyleras för djupa borrhål.

Det finns en risk för påverkan av de hydrologiska aspekterna under en kommande istid. Tyngden av den tjocka inlandsisen medför en omfördelning av trycket vilket påverkar potentialskillnaderna i mark och berggrund. Detta skulle kunna ha stor inverkan på flödets storlek och riktning. SKB har funnit att grundvattnet kan påverkas av de stora mängderna sötvatten som frigörs då isen smälter. Detta utsläpp kan komma att påverka salthalten i det djupa grundvattnet. Sådana effekter från den senaste inlandsisen har modellerats och tecken tyder på viss utspädning.

De tektoniska plattornas rörelse skapar alltid en viss påverkan, eller stress, på jordskorpan. Denna stress reglerar endogena processer såsom vulkanutbrott och jordskalv. Stressen gör att det alltid finns en risk för jordskalv, inte bara vid plattgränserna utan även mitt på kontinentalplattorna, vilket kan vara ett hot mot slutförvaret. Skjuvningen av markytan som uppstår vid en inlandsis tros inte påverka ett djupförvar. Skjuvning som uppstår vid ett jordskalv kan dock vara ett hot om den skapar stora sprickor i kontakt med borrhålet.



## 7.2 DISKUSSION AV KUNSKAPSLUCKOR

För att analysera den långsiktiga säkerheten för ett slutförvar krävs utförliga platsundersökningar för att bland annat få information om berggrunden. Detta är gjort för KBS-3 i Forsmark och Laxemar av SKB. Vad gäller djupa borrhål är situationen annorlunda. De få djupa borrhål som finns ger inte tillräcklig förståelse för berget, kemin och andra faktorer på dessa djup. Överlag finns ett behov av grundforskning på berggrunden på 3-5 km djup för att kunna förstå processerna. Att skaffa den informationen skulle kräva en avsevärd arbetsinsats som bland annat skulle medföra borrhåll och utveckling av förvarskoncept. Den borrhål som nyligen köpts in av Lunds Universitet kommer förmodligen borrhåll med en för liten diameter för att kunna föra ned de undersökningsinstrument som behövs för att avgöra om djupa borrhål är ett alternativ. En vidare utveckling av mätinstrument kommer förmodligen krävas.

De geologiska modeller som har tagits fram bygger endast på data från ett fåtal borrhål. Det krävs en vidare forskning på geologin på stora djup för att förbättra modellerna. Kraven som ställs på berget som barriär måste kontrolleras i varje borrhål för att bland annat undvika sprickzoner, då dessa kan variera mellan olika platser i berget. Bra modeller kan svara på allmänna frågor, men en specifik plats måste alltid undersökas för att få detaljkunskap.

Det finns modeller för hur bergspänningar kan beräknas. Med hjälp av dem kan kalkyler göras på hur ett slutförvar påverkas som konsekvens av en jordbävning. Detta är till exempel intressant till följd av den ökade jordbävningens frekvensen en istid kan ge. Dock kan en modellering för hur ett slutförvar i form av djupa borrhål skadas vid jordbävning inte i dagsläget genomföras eftersom kapselmateriale och borrhålets dimensioner inte är fastställda.

Konceptet djupa borrhål bygger på ett barriärsystem där berget och vattnet med dess densitetsgradient är den viktigaste faktorn. För att förutse hur radionuklider transporteras vid ett eventuellt läckage fodras omfattande kartläggning av den svenska berggrunden på stora djup. När det gäller att utreda de hydrologiska förutsättningarna krävs framförallt data kring sprickzoner och salthalter.

Det finns flera, mer eller mindre utvecklade, modeller för grundvattenflöden. Dock verkar det generellt saknas tillräckligt med indata för att kunna dra fullständiga slutsatser. I dagens läge är endast ett fåtal undersökningar gjorda på dessa stora djup i hydrologiskt syfte. Det behövs därmed resultat från ytterligare fältstudier för att kunna säkerställa en plats med hydrologisk lämplighet för ett slutförvar av använt kärnbränsle.

Vidare krävs forskning på inlandsisarnas påverkan på hydrologin och grundvattenflödet på stora djup. Undersökningsinstrument måste även utvecklas för att kunna göra relevanta analyser.

Det är viktigt att ta hänsyn till bakterierna i berggrunden när ett slutförvar designas. För djupa borrhål verkar dock bakteriernas roll vara liten då deras påverkan på kapseln är mindre betydande i sammanhanget. Kapselmaterialet påverkas snarare av tryck, temperatur och salthalt. Dessa faktorer kommer förmodligen göra mer skada än bakterierna.

Åsikterna för huruvida det finns teknik för att klara av borrhåll och deponering i djupa borrhål går isär. Utifrån rapporter skrivna på ämnet framgår att vissa anser att dagens teknik är tillräcklig, men att specialanpassad utrustning saknas (Bjelm i KASAM, 2007; Harrison, 2000; Åhäll, 2011). Andra författare har däremot skilda åsikter och menar att fortsatt utveckling krävs för att möjliggöra konceptet (Beswick, 2008; Grundfeldt, 2010; Nord i KASAM, 2007). Skillnader i slutsatser visar svårigheten med att göra en allmän bedömning av tillgänglig teknik. Uppskattningen av tillräcklig teknik bjuder också på lika stora svårigheter, då inga storskaliga experimentella försök genomförts. Därför borde en pilotstudie vara av hög prioritet för att värdera de praktiska möjligheterna. Till följd av den höga kostnaden finns ingen förväntan på genomförandet av en pilotstudie i Sverige. För närvarande sker dock planering av en sådan i USA, som kan startas upp om 3 år (Åhäll, 2011).

För att utveckla rätt borrhåll- och deponeringsteknik måste utformningen av kapslarna först fastslås. Vid bedömningar om tillgänglig teknik för borrhåll och deponering har olika antaganden om kapselns utformning gjorts, vilket gör dessa uppskattningar än svårare. En sak kan konstateras, ju mindre kapseln görs desto troligare är det att borrhållstekniken finns tillgänglig. Nackdelen som följer är att fler borrhåll krävs och att den totala kostnaden för slutförvaret troligtvis blir högre. Vidare är det borrhållsindustrin som innehar tekniken och det är av central betydelse att den fortsatta utvecklingen sker i samråd med den.

Förslutningen är en betydligt svårare fråga som kräver omfattande utredning. Tätningen mellan berget och foderrör kräver utveckling. En större insats krävs för att reda ut om några av idéerna i dagens läge skulle vara praktiskt genomförbara.

Frågan om återupptag av kärnbränslet från djupa borrhåll blir mest en diskussion om resurser. Om det är möjligt eller inte beror på vilka kapital och medel som samhället är villiga att bruka. Eftersom planen i det svenska kärnavfallsprogrammet aldrig varit att ta upp det använda kärnbränslet igen bör inte frågan vara avgörande huruvida djupa borrhåll kan bli ett alternativ som slutförvar eller inte. Större vikt bör läggas på att se till både den korta och långsiktiga säkerheten. Eventuella möjligheter till återupptag får istället ses som en bonus.

## 8 SLUTSATS

Det kan konstateras att den generella kunskapen om djupa borrhål är bristfällig. Detta beror dels på att forskningsområdet är resurskrävande samt att konceptet först genomgått något av en renässans de senaste åren.

God kunskap finns vad gäller vissa av bergets egenskaper såsom temperatur och spänning. Det finns även ett flertal modeller för att kalkylera grundvattenflöden, dessa behöver dock kompletteras med indata från fältstudier. Det måste dock ske en ökning av den allmänna kunskapen om de hydrologiska och geologiska förhållandena på deponeringsdjupen. Kännedomen om dessa djup är begränsad då endast enstaka borrhål gjorts, således finns inte tillräcklig data för att kunna dra några klara slutsatser. Vidare är den erhållna kunskapen från dessa borrhål inte alltid direkt överförbar till den svenska berggrunden. Därmed måste omfattande undersökningar göras i Sverige, med särskilt fokus på det specifika deponeringsområdet. För att modellera grundvattenflöden krävs övergripande kartläggning av sprickzoner. Detta ger möjlighet att analysera bergrundens permeabilitet. Viktigt är även lokalisering av saltfronten, då denna måste vara stabil och lämpligen ytlig. Därtill bör tillförlitlig modellering av yttre påverkan såsom istid och jordbävning utföras.

Idag råder asymmetri kring det tekniska kunskapsläget. Kapseltillverkningen är praktiskt möjlig och begränsas av valet av dimensioner. Underlag för val av buffert och förslutningsmaterial måste vidareutvecklas. Detta är beroende av god kartläggning av miljön på deponeringsdjupet. De tekniska svårigheterna inkluderar borrhållning, tätning samt deponering. Borrtekniken måste utvecklas i samråd med aktörer inom borrhållindustrin då de besitter kunskap, erfarenhet och teknik på området. Vidare måste fungerande lösningar för tätning kring foderrören utformas. I dagsläget råder stor oklarhet angående deponeringen, vilken är problematisk då momentet omfattar stora säkerhetsrisker vid händelse av att kapseln skulle fastna eller skadas på vägen ner. Utvecklingen av deponeringstekniken kräver omfattande resurser och i dagsläget finns egentligen bara en fullständig teori för hur deponeringen ska utföras. Denna är beroende av vidare teknikutveckling.

Det kan konstateras att forskare har olika syn på de tekniska förutsättningarna och därmed är det svårt att dra någon konkret slutsats kring tekniken för att konkretisera konceptet djupa borrhål.

I teorin skulle konceptet djupa borrhål kunna vara ett alternativ som slutförvar för använt kärnbränsle. De praktiska momenten bjuder dock på stora svårigheter som möjligen kan lösas med omfattande investeringar på forskning och teknisk utveckling. Om resultatet av sådana efterforskningar är goda, bör konceptet vara en möjlig metod för slutförvar i framtiden. Utgående från denna rapport anses att djupa borrhål i dagsläget inte kan uteslutas som möjligt slutförvar av använt kärnbränsle.

## 9 TACK

Under arbetet med denna kandidatuppsats har vi varit i kontakt med och intervjuat en mängd olika personer med expertis inom olika områden. Vi vill tacka er alla för er hjälp och det stora tålamod som ni visat.

Vi skulle speciellt vilja tacka följande för all hjälp som vi har fått:

Lars Birgersson

Holmfridur Bjarnadottir

Matthew Brian

Lillemor Claesson-Liljedahl

Fergus Gibb

Bertil Grundfelt

Christopher Juhlin

Ola Karnland

Björn Lund

Raymond Munier

Jens-Ove Näslund

Roland Roberts

Allan Rodhe

Erik Setzman

Magnus Simonsson

Michael Stephens

Peter Szakalós

Karl-Inge Åhäll

## 10 REFERENSER

### 10.1 PERSONLIG KONTAKT

Birgersson, Lars (2011). Mailkontakt 11-05-18.

Claesson-Liljedahl, Lillemor (2011). Intervju 11-05-11.

Grundfelt, Bengt (2011). Presentation 11-05-11.

Herbert, Roger (2011) Samtal 11-05-23.

Juhlin, Christopher (2011). Intervju 11-04-15.

Karnland, Ola (2011). Intervju 11-05-19.

Lund, Björn (2011). Intervju 11-04-13.

Munier, Raymond (2011). Intervju 11-05-11.

Näslund, Jens-Ove (2011). Intervju 11-05-11.

Szkalós, Peter (2011). Intervju 11-05-18.

### 10.2 KÄLLOR

Alstrup Jensen, K. & Ewing, R. (2001) The Okélobondo natural fission reactor, southeast Gabon: Geology, mineralogy, and retardation of nuclear-reaction products. *Geological Society of American Bulletin*, 113, 32-62. Tillgänglig på Internet:

<http://gsabulletin.gsapubs.org.ezproxy.its.uu.se/content/113/1/32.full.pdf+html> [Hämtad 2011-05-05].

Anderson, C., Jakobsson, A.-M., Pedersen, K. (2007) Influence of in situ biofilm coverage on the radionuclide adsorption capacity of subsurface granite. *Environmental Science & Technology*, 41 (3), 830-836. Tillgänglig på Internet: <http://dx.doi.org/10.1021/es0608702> [Hämtad 2011-05-03].

Anderson, C. R., Jakobsson, A. M., Pedersen, K. (2006) Autoradiographic comparisons of radionuclide adsorption between subsurface anaerobic biofilms and granitic host rocks. *Geomicrobiological Journal*, 23, 15-29.

Bergström, I. (2010) Istider kan påverka slutförvaret. *Strålsäkert*, 3. Tillgänglig på Internet:

<http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Ommyndigheten/Stralsakert/Artiklar/Istider-kan-paverka-slutforvaret/> [Hämtad 2011-04-08].

Beswick, J. (2008) *Status of technology for deep borehole disposal*. EPS International.

- Brady, P. V., Arnold, B. W., Freeze, G. A., Swift P. N., Bauer S. J., Kanney, J. L., Rechar, R. P., Stein J. S. (2009) *Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste*. Sandia National Laboratories. Tillgänglig på Internet: [http://www.mkg.se/sites/default/files/old/uploads/Deep Borehole Disposal\\_High-Level Radioactive Waste - Sandia Report 2009-4401 August 2009.pdf](http://www.mkg.se/sites/default/files/old/uploads/Deep_Borehole_Disposal_High-Level_Radioactive_Waste_-_Sandia_Report_2009-4401_August_2009.pdf) [Hämtad 2011-05-03].
- Bram, K., Draxeler, J., Hirschmann, G., Zoth, G., Hiron, S., Küher, M. (1995) The KTB Borehole – Germany’s Superdeep Telescope into the Earth’s Crust. *Scientific drilling*, 4-58.
- Encyclopædia Britannica (2011) *Canadian shield*. Tillgänglig på Internet: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/91992/Canadian-Shield> [Hämtad 2011-05-16].
- Ergon, J. (2011) *Den nya atomåldern - del 1: Säkerheten, avfallet och framtidens generationer kärnkraft*. Tillgänglig på Internet: <http://svt.se/svt/jsp/Crosslink.jsp?d=58360&a=705706&printerfriendly=true> [Hämtad 2011-05-18].
- Ericsson, L.O., Holmén, J., Rhén, I., Blomquist, N. (2006) *Storregional grundvattenmodellering – fördjupad analys av flödesförhållanden i östra Småland. Jämförelse av olika konceptuella beskrivningar*. SKB R-06-64.
- Evins, L. Z. (2003) En naturlig kärnreaktor, *Forskning och Framsteg*, 2. Tillgänglig på Internet: <http://www.fof.se/tidning/2003/2/en-naturlig-karnreaktor> [Hämtad 2011-05-06].
- Eydal, H. (2009) Microbial ecology in deep granitic groundwater - activity and impact of viruses. Tillgänglig på Internet <http://hdl.handle.net/2077/20094> [Hämtad 2011-04-08].
- García García, S. (2010) *Generation, stability and migration of montmorillonite colloids in aqueous system*.
- Gibb, F.G.F., McTaggart, N.A., Travis, K.P., Burley, D., Hesketh, K.W. (2007) High-density support matrices: Key to the deep borehole disposal of spent nuclear fuel, *Journal of Nuclear Materials*, 374, 370-377.
- Grip H. & Rodhe A. (2009) *Vattnets väg från regn till bäck*. Stockholm: Hallgren & Fallgren Studieförlag AB.
- Grundfelt, B. (2010) *Jämförelse mellan KBS-3-metoden och deponering i djupa borrhål för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle*. Kemakta Konsult AB. SKB R-10-13.

- Grundfelt, B. & Wiborg, M. (2006) *Djupa borrhål – Status och analys av konsekvenserna vid användning i Sverige*. Kemakta Konsult AB. SKB R-06-58.
- Harrison, T. (2000) *Very Deep Borehole. Deutag's opinion on boring, canister emplacement and retrievability*. Well Engineering Partners BV. SKB R-00-35.
- Hellberg, A. (2005) *Jordskalv i Sundsvall*. DN. Tillgänglig på Internet: <http://www.dn.se/nyheter/sverige/jordskalv-i-sundsvall> [Hämtad 2011-05-24].
- Hendriks, M. R. (2010) *Introduction to physical hydrology*. New York: Oxford University Press.
- Hoag, C.I., (2005) *Canister design for deep borehole disposal of nuclear waste*.
- Houghton Mifflin (2002) *Hydrostatic pressure*. Tillgänglig på Internet: <http://dictionary.reference.com/browse/hydrostatic+pressure> [Hämtad 2011-05-14].
- Japan Nuclear Cycle Development Institute (2000) *The geological environment of Japan. In Geological Isolation Research Project, Overview Report H12*. Engelsk version.
- Jaquet, O. & Siegel, P. (2006) *Regional groundwater flow model for a glaciation scenario Simpevarp subarea " version 1.2"*. SKB R-06-100. Tillgänglig på Internet <http://www.skb.se/upload/publications/pdf/R-06-100webb.pdf> [Hämtad 2011-05-19].
- Jensen, K.G., Driscoll, M.J. (2010) *A Framework for Performance Assessment and Licensing of Deep Borehole Repositories*. MIT-NFC-PR-115.
- Juhlin, C., Wallroth, T., Smellie, J., Eliasson, T., Ljunggren., Leijon, B & Beswick, J. (1998) *The very deep hole concept: Geoscientific appraisal of conditions at great depth*. SKB TR-98-05.
- Juhlin, C. & Sandstedt, H. (1989) *Storage of nuclear waste in very deep boreholes: Feasibility study and assessment of economic potential*. SKB TR-89-39.
- KASAM (2007) *Djupa borrhål- Ett alternativ för slutförvaring av använt kärnbränsle?* Rapport från KASAM:s utfrågning den 14–15 mars 2007. Rapport 2007:6.
- Kjellman, S. (2000) *Det svenska kärnavfallsprogrammet*. SKB.
- Kärnavfallsrådet (2011) *Kunskapsläget på kärnavfallsområdet 2011-geologin, barriärerna, alternativen*. SOU 2011:14.
- Lemieux J M. (2006) *Impact of the Wisconsinian glaciation on Canadian continental groundwater flow*. PhD Thesis. Canada: University of Waterloo.

- Louvat, D., Michelot, J.-L., Aranyosy, J-F. (1999) *Origin and residence time of salinity in the Äspö groundwater system.*
- Marsic, N., Grundfelt, B. & Wiborgh, M. (2006) *Very deep hole concept, Thermal effects on groundwater flow.* SKB R-06-59.
- Nationalencyklopedin. Tillgänglig på Internet: <http://www.ne.se/lang/instr%C3%B6mningsomr%C3%A5de#> [Hämtad 2011-05-10].
- Nilsson, K. (2006) Jordskalv i slutförvaret för kärnavfall - Seminarium och utfrågning. Tillgänglig på Internet: <http://nonuclear.se/files/lko-oskarshamn20070524.pdf> [Hämtad 2011-05-09].
- Näslund, J.-O. (2007) Hur kan djupa borrhål påverkas av glaciation? ”*Djupa borrhål: ett alternativ för slutförvaring av använt kärnbränsle?* Rapport 2007:6, Statens råd för kärnavfallsfrågor, s 32–35. Tillgänglig på Internet <http://www.skb.se/50d041cd-f083-42c2-a92f-b76fe7650421.fodoc> [Hämtad 2011-04-11].
- Odysseus unbound: the search for homers Ithaca (2010) Tillgänglig på internet: <http://www.odysseus-unbound.org/news.html> [Hämtad 2011-05-25]
- Onstott, T.C., Phelps, T.J., Colwell, F.S., Ringelberg, D., White, D.C. & Boone, D.R., (1998) Observations pertaining to the origin and ecology of microorganisms recovered from the deep subsurface of Taylorsville Basin, Virginia. *Geomicrobiological Journal* 15, 353–383.
- Pedersen, K. (2010) The deep biosphere. *GFF*, 132, 93–94. Tillgänglig på Internet: [http://pdfserve.informaworld.com/833087\\_751319972\\_922087216.pdf](http://pdfserve.informaworld.com/833087_751319972_922087216.pdf) [Hämtad 2011-05-05].
- Pedersen, K. (2010) Analysis of copper corrosion in compacted bentonite clay as a function of clay density and growth conditions for sulfate-reducing bacteria. *Journal of Applied Microbiology*. 108 (3), 1094-1104. Tillgänglig på Internet: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2672.2009.04629.x> [Hämtad 2011-05-03].
- Pedersen, K., Arlinger, J., Eriksson, S., Hallbeck, A., Hallbeck, L. & Johansson, J. (2008) Numbers, biomass and cultivable diversity of microbial populations relate to depth and borehole-specific conditions in groundwater from depths of 4-450 m in Olkiluoto, Finland. *ISME Journal* 2, 760–775.
- Pedersen, K. (2005) Microorganisms and Their Influence on Radionuclide Migration in Igneous Rock Environments. *Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences*. 6



(1), 11-15. Tillgänglig på Internet:  
<http://wwwsoc.nii.ac.jp/jnrs/paper/JN61/jn6103.pdf> [Hämtad 2011-05-03].

Perhans, K-E. (2003) *Endogena processer och landformer*. Stockholm.

Perhans, K-E. (2002) *Istidens landskap – jordarter och terrängformer*. Stockholm.

Roxburgh, I.S. (1987) *Geology of high-level nuclear waste disposal*. New York: Chapman and Hall, Kap 8.

SGU (2011) Skredärr och förkastningar – spår efter jordbävningar. Tillgänglig på Internet:  
<http://www.sgu.se/sgu/sv/geologi/jordtacket/efter-istiden/skredarr.html> [Hämtad 2011-05-10].

Skagius, K. (2010) *Geosphere process report for the safety assessment SR-Site*. SKB TR-10-48.

SKI 95:97 (1994) *Acceptanskriterier för berggrunden vid djup geologisk slutförvaring av använt kärnbränsle, Proceedings från ett seminarium på Göteborgs universitet 13-14 september 1994*. SKI Rapport 95:97.

Smellie, J. (2004) *Recent geoscientific information relating to deep crustal studies*. Conterra AB. SKB R-04-09.

Strandman, J. (2008) *Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om säkerhet vid slutförvaring av kärnämne och kärnavfall*. SSMFS2008:21. Stockholm: Strålsäkerhetsmyndighetens författarsamling.

Strålsäkerhetsmyndigheten (2010) *Anläggningar i Sverige*. Tillgänglig på Internet:  
<http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Allmanhet/Karnkraft/Karnkraftverk/Anlaggningar-i-Sverige/> [Hämtad 2011-05-18].

Svensk Kärnbränslehantering AB (2000) *Förvarsalternativet djupa borrhål. Innehåll och omfattning av FUD-program som krävs för jämförelse med KBS-3-metoden*. SKB R-00-28.

Svensk Kärnbränslehantering AB (2002) *Övergripande konstruktionsförutsättningar för djupförvaret i KBS-3-systemet*. SKB R-02-44.

Svensk Kärnbränslehantering AB (2006) *Kapsel för använt kärnbränsle. Konstruktionsförutsättningar*. SKB R-06-02.

Svensk Kärnbränslehantering AB (2007) *Långsiktig säkerhet för slutförvar för använt kärnbränsle vid Forsmark och Laxemar - en första värdering. Förenklad svensk sammanfattning av säkerhetsanalysen SR-Can*. SKB R-07-24.

Svensk Kärnbränslehantering AB (2009) *Berättelsen om Forsmark*. EnalInfo/Edita.

- Svensk Kärnbränslehantering AB (2010) *Fud-program 2010 Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall*. SKB-Fud10.
- Svensk Kärnbränslehantering AB (2011) *Sifferfakta: Hur många, hur långa, hur mycket och när?* Tillgänglig på Internet: [http://skb.se/Templates/Standard\\_30060.aspx](http://skb.se/Templates/Standard_30060.aspx) [Hämtad 2011-05-18].
- Svensk Kärnbränslehantering AB (2011) *Så går vi vidare*. Tillgänglig på Internet: [http://skb.se/Templates/Standard\\_30808.aspx](http://skb.se/Templates/Standard_30808.aspx), [Hämtad 2011-05].
- Swahn, J. (2011) Haveri för kärnavfallet - Synpunkter på kraftindustrins planer för slutförvaring. Tillgänglig på Internet: [http://www.mkg.se/uploads/Naturskyddsforeningen\\_och\\_MKGs\\_rapport\\_haveri\\_for\\_karnavfallet\\_110315.pdf](http://www.mkg.se/uploads/Naturskyddsforeningen_och_MKGs_rapport_haveri_for_karnavfallet_110315.pdf), [Hämtad 2011-05-04].
- Swissinfo – Online tidning (2007, 6 jan). Geothermal project shakes Basel again. *Swissinfo*. Tillgänglig på Internet: [http://www.swissinfo.ch/eng/Home/Archive/Geothermal\\_project\\_shakes\\_Basel\\_again.html?cid=46284](http://www.swissinfo.ch/eng/Home/Archive/Geothermal_project_shakes_Basel_again.html?cid=46284) [Hämtad 2011-05-12].
- Toth J. & Sheng G. (1994) Enhancing nuclear waste disposal safety by exploiting regional groundwater flow – An exploratory proposition. *Annual International Conference, Fifth, High-Level Radioactive Waste Management, Proceedings*, Las Vegas, Nevada, 1994: American Nuclear Society, Inc., and American Society of Civil Engineers, 1797-1804.
- Toth, J. & Sheng, G. (1996) Enhancing safety of nuclear waste disposal by exploiting regional groundwater flow: The Recharge Area Concept. *Hydrogeology Journal*, 4, 4-25.
- Vattenfall (2011) *Om kärnkraft*. Tillgänglig på Internet: <http://www.vattenfall.se/sv/om-karnkraft.htm> [Hämtad 2011-05-18].
- Voss, C. I. & Provost, A. M. (2001) *Recharge-area Nuclear Waste Respository in Southeastern Sweden, Demonstration of Hydrogeologic Siting Concepts and Technique*. SKIReport 01:44.
- World Nuclear Association (2011) *Nuclear Power in Sweden*. Tillgänglig på Internet: <http://www.world-nuclear.org/info/inf42.html> [Hämtad 2011-05-18].
- Åhäll, K-I. (2006) *Slutförvaring av högaktivt kärnavfall i djupa borrhål, en utvärdering baserad på senare års forskning om berggrunden på stora djup*. Tillgänglig på Internet: <http://oss.avfallskedjan.se/wp->

[content/uploads/2009/05/mkgrappport\\_djupaborrhal2006.pdf](content/uploads/2009/05/mkgrappport_djupaborrhal2006.pdf) [Hämtad 2011-05-04].

Åhäll, K-I. (2007) *Slutförvaring av högaktivt kärnavfall I djupa borrhål: en utvärdering baserad på senare års forskning om berggrunden på stora djup.*

Åhäll, K-I. (2009) *Brister i redovisningen av djupa borrhål som alternativmetod inför MKB-prövningen av ett svenskt slutförvar.* Tillgänglig på Internet: <http://nonuclear.se/files/ahall20090327.pdf> [Hämtad 2011-05-04].

Åhäll, K-I. (2011) *Deponeringsdjupets betydelse vid slutförvaring av högaktivt kärnavfall i berggrunden, en karakterisering av grunda och djupa slutförvar.*

Öström, C. (1993). *Istiderna som kommer. Fakta om...* Jakobsbergs Tryckeri AB. Tillgänglig på Internet: <http://www.ostrom.se/fakta%20om%20istider.pdf> [Hämtad 11-05-09].