

## Jämförelse mellan KBS-3-metoden och deponering i djupa borrhål för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle

Bertil Grundfelt, Kemakta Konsult AB

September 2010

**Svensk Kärnbränslehantering AB**

Swedish Nuclear Fuel  
and Waste Management Co

Box 250, SE-101 24 Stockholm  
Phone +46 8 459 84 00



# **Jämförelse mellan KBS-3-metoden och deponering i djupa borrhål för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle**

Bertil Grundfelt, Kemakta Konsult AB

September 2010

Denna rapport har gjorts på uppdrag av SKB. Slutsatser och framförda åsikter i rapporten är författarnas egna. SKB kan dra andra slutsatser, baserade på flera litteraturkällor och/eller expertsynpunkter.

En pdf-version av rapporten kan laddas ner från [www.skb.se](http://www.skb.se).

## Förord

Föreskrifter i svensk lagstiftning och i internationella överenskommelser ger uttryck för samhällets krav på hantering och slutförvaring av använt kärnbränsle från kärnkraftverken. Med utgångspunkt i dessa krav har SKB definierat syftet med arbetet att omhänderta det använda kärnbränslet enligt följande:

*SKB:s syfte är att bygga, driva och försluta ett slutförvar med fokus på säkerhet, strålskydd och miljöhänsyn. Slutförvaret utformas så att olovlig befattning med kärnbränsle förhindras, både före och efter förslutning. Den långsiktiga säkerheten ska baseras på ett system av passiva barriärer.*

*Slutförvaret är avsett för använt kärnbränsle från de svenska kärnreaktorerna och ska skapas inom Sveriges gränser med frivillig medverkan av berörda kommuner.*

*Slutförvaret ska etableras av de generationer som dragit nytta av de svenska kärnreaktorerna och utformas så att det, efter förslutning förblir säkert utan underhåll eller övervakning.*

Denna rapport har tagits fram för att göra en jämförelse mellan slutförvaring av använt kärnbränsle enligt KBS-3-metoden och deponering i djupa borrhål. Syftet är att jämföra förutsättningarna för val mellan två alternativa handlingsvägar för slutförvaring av använt kärnbränsle. De frågeställningar som behandlas gäller förutsättningarna för val av förläggningsplats, uppförande, deponering och förslutning, kärnteknisk säkerhet vid hantering, långsiktig säkerhet, fysiskt skydd och kärnämneskontroll, samt planeringsförutsättningar i form av ledtider, utvecklingsbehov och kostnader.

Rapporten bygger på en kombination av publicerat material samt material som har tagits fram av SKB:s experter. Den har sammanställts och redigerats av Bertil Grundfelt vid Kemakta Konsult AB. Värdefulla bidrag har erhållits från:

- Torbjörn Hugo-Persson (SKB), Per Tengborg och Rune Glamheden (Golder Associates), Anders Odén (Syslog Consulting) samt Håkan Sandstedt (Ramböll) vad avser borrhåll för framställning av djupa borrhål,
- Bengt Lönnerberg (SKB) vad avser hantering och kärnteknisk säkerhet vid hantering för KBS-3-metoden och för deponering i djupa borrhål samt
- Jens-Ove Näslund (SKB) avseende påverkan från framtida klimatförändringar.

## Sammanfattning

I denna rapport redovisas en jämförelse mellan slutförvaring av använt kärnbränsle enligt KBS-3-metoden respektive genom deponering i djupa borrhål. Syftet har varit att lyfta fram metodskiljande faktorer. Ambitionen har varit att göra jämförelsen så rättvisande som möjligt trots att det föreligger stora skillnader i både kvantitet och kvalitet på dataunderlaget mellan de två metoderna.

KBS-3-metoden bygger på att använt kärnbränsle kapslas in i täta och korrosionsbeständiga kopparkapslar och slutförvaras på cirka 500 meters djup i det svenska urberget, omgivna av en skyddande lerbuffert. Metoden har utvecklats under drygt tre decennier och en omfattande geovetenskaplig kartläggning av den övre kilometern av berggrunden har genomförts på ett tiotal platser. Detta har medfört att kunskaperna om förhållandena i denna övre kilometer är goda.

Under de senaste 15–20 åren har ett stort arbete lagts ner på en lokaliserings- och förankringsprocess som har lett fram till att kompletta platsundersökningar genomförts i två områden, Forsmarksområdet i Östhammars kommun respektive Laxemarområdet i Oskarshamns kommun, för lokalisering av ett slutförvar enligt KBS-3-metoden. SKB har i juni 2009 beslutat välja Forsmarksområdet som förlägningsplats för slutförvaret och utarbetar nu tillståndsansökningar enligt kärntekniklagen och miljöbalken för att få uppföra, inneha och driva en slutförvarsanläggning på denna plats.

Utformningen av ett slutförvar i djupa borrhål är ett koncept som i sina huvuddrag togs fram av SKB under Projekt AlternativStudier Slutförvar, Pass, i slutet av 1980-talet och början av 1990-talet. Konceptet, som internationellt refereras som det mest genomarbetade för deponering i djupa borrhål, bygger på att inkapslat använt bränsle slutförvaras på mellan två och fyra kilometers djup. Kapslarna omges av en buffert bestående av en blandning av bentonit och en deponeringsslurry. Den kapsel som föreslogs i Pass-studien är en betongfylld titankapsel.

Mycket litet är i dag känt om de faktiska geologiska, hydrogeologiska och geokemiska förhållandena på dessa stora djup. Man förväntar sig emellertid att grundvattnet under flacka områden ska ha en hög salthalt och därmed en hög densitet, vilket i sin tur medför att grundvattenrörelserna är långsamma.

Den huvudsakliga säkerhetsfunktionen för djupa borrhål och KBS-3 skiljer sig åt. I de säkerhetsanalyser som har gjorts av KBS-3-metoden visar sig inneslutningen av bränslet i den täta kopparkapseln vara den väsentligaste säkerhetsfunktionen på lång sikt. För djupa borrhål antas istället de förväntat långsamma grundvattenrörelserna på stora djup vara den viktigaste säkerhetsfunktionen.

Uppförandet av ett slutförvar enligt KBS-3-metoden bygger på etablerad bergbyggnadsteknik. Borrteknik för uppförande av en anläggning för deponering i djupa borrhål behöver utvecklas. Det finns teknik att utgå från, men den fortsatta utvecklingen måste bedrivas av kärnkraftsindustrin, eftersom det inte finns någon efterfrågan för så djupa och vida hål i kristallint berg från någon annan bransch.

Alla moment som behövs för att hantera och deponera det använda bränslet enligt KBS-3-metoden har utformats för att åstadkomma en långt gående kontrollerbarhet och verifierbarhet i varje moment. Vid deponering i djupa borrhål kan motsvarande kontrollerbarhet och verifierbarhet inte åstadkommas.

Hantering av använt kärnbränsle enligt KBS-3-metoden bygger på erfarenheter från andra verksamheter där skydd mot joniserande strålning är väsentligt. Detta innebär bland annat att konsekvenserna av missöden kan hanteras på ett säkert sätt. I arbetet med att ta fram hanteringsmetoder spelar missödesanalysen en central roll. Vid deponering i djupa borrhål kan missöden inträffa med konsekvenser som inte kan åtgärdas. Exempelvis kan en kapsel fastna i hålet och gå sönder innan den har nått deponeringsdjup. Detta kan medföra att en otät kapsel sitter fast i ett läge med strömmande grundvatten, utan att vara omgiven av en skyddande buffert.

De säkerhetsanalyser som genomförts av KBS-3-metoden har visat att slutförvaret med koppar-kapslarna omgivna av en bentonitbuffert är motståndskraftigt mot de påfrestningar som kan uppstå vid framtida jordbävningar och nedisningar. I ett slutförvar enligt konceptet djupa borrhål kan ingen eller mycket liten skyddseffekt tillgodoräknas från kapsel och buffert vid sådana yttre påfrestningar. Detta på grund av att okontrollerad deponering och ogynnsam miljö gör, att man med säkerhet endast kan tillgodoräkna sig en barriär på lång sikt, den naturliga bergbarriären. Det är i dag okänt vilka konsekvenserna kan bli för säkerheten för ett slutförvar enligt principen djupa borrhål vid en framtida nedisning eller en jordbävning.

Enligt internationella regelverk ska ett system för kärnämneskontroll finnas till dess att kärnämnet är praktisk oåtkomligt. Ett slutförvar enligt KBS-3-metoden är *en* sammanhållen kärnteknisk anläggning. Delarna på markytan är inte större än att fysiskt skydd kan arrangeras genom inhägnad och bevakning på normalt sätt. Vid deponering i djupa borrhål kommer *varje* borrhål att utgöra en kärnteknisk anläggning som måste inhägnas och bevakas.

Enligt svensk lagstiftning ska slutförvaret utformas så att olovlig befattning med kärnbränsle förhindras även efter förslutning. Det har framhållits att det använda bränslet skulle vara mer ”stödsäkert” förvarat i djupa borrhål än i ett slutförvar enligt KBS-3-metoden, tack vare det större djupet. Dock är återtag av kapslar även från ett förslutet KBS-3-förvar en storskalig operation som kräver en insats och inte kan försiggå i det fördolda.

KBS-3-metoden är i dag tillräckligt utvecklad för att man ska kunna gå vidare med tillståndsansökningar. Ett slutförvar enligt KBS-3-metoden skulle kunna byggas, drivas och förslutas inom en tidsperiod av cirka 50 år. Den bedömning SKB gjorde år 2000 är att det skulle ta ytterligare drygt 30 år och kosta drygt fyra miljarder kronor i den tidens penningvärde att utveckla kunskapen om djupa borrhål till en sådan nivå att man kan jämföra metoderna på likställd bas. Med hänsyn till vad som redovisas i denna rapport är det osäkert om ett sådant program skulle leda till att djupa borrhål kan anses säkrare än KBS-3-metoden. Kanske måste man efter en sådan jämförelse överge metoden för att återgå till att satsa på KBS-3, eller något helt annat. Om djupa borrhål skulle visa sig vara en lämplig metod tillkommer tid för lokalisering, projektering, ansökan och tillstånd. Även om osäkerheterna i kostnadsuppskattningar är stora, är det troligt att ett slutförvar i djupa borrhål blir dyrare att utveckla, bygga, driva och försluta än ett slutförvar enligt KBS-3-metoden. Internationellt pågår i dag inget utvecklingsarbete omkring djupa borrhål, medan alla kärnkraftsländer med program för slutförvaring studerar olika former av geologisk deponering i tunnelbaserade koncept som huvudalternativ.

## Summary

In this report a comparison is made between disposal of spent nuclear fuel according to the KBS-3 method with disposal in very deep boreholes. The objective has been to make a broad comparison between the two methods, and by doing so to pinpoint factors that distinguish them from each other. The ambition has been to make an as fair comparison as possible despite that the quality of the data of relevance is very different between the methods.

The KBS-3 method is based on encapsulation of the spent fuel in leak-tight and corrosion resistant copper canisters followed by disposal of the canisters at a depth of about 500 metres in the Swedish bedrock, where they will be surrounded by a protective clay buffer. The method has been developed over a period of about three decades. During this period a comprehensive mapping of the geoscientific properties of the upper kilometre of the rock has been performed. As a consequence of this work, the knowledge of the conditions in this upper kilometre of the rock is good today.

During the last 15–20 years a substantial programme for finding a site and to gain acceptance by the local community at that site has been carried out. As a consequence of this programme, SKB has conducted investigations at three candidate areas for siting a KBS-3 repository, the Forsmark area in Östhammar's municipality, and the Simpevarp peninsula and the Laxemar area in Oskarshamn's municipality. SKB is now in the process of preparing applications for permits according to the act on Nuclear Activities and the Environmental code to construct, own and operate a repository at the chosen site.

The design of the a deep borehole repository assumed in this study is based on a study called Project on Studies of Alternative Repository Concepts, Pass, performed by SKB in the end of the 1980-s and the beginning of the 1990s. This concept, which internationally is referred to as the most elaborated deep borehole concept available, is based on disposal of encapsulated fuel in boreholes at a depth between 2 and 4 kilometres. The canister proposed in the Pass study was a concrete grouted titanium canister. Very little is known today about the actual geological, hydrogeological and geochemical conditions at these great depths. However, it is expected that the groundwater underneath flat landscapes will have high salinity and hence a high density.

The main safety functions of the two concepts differ. In the safety assessments performed for the KBS-3 method, the containment of the fuel in the long-term leak tight canister is the most important safety function. For disposal in deep boreholes it is assumed that the high salt content of the deep groundwater will create essentially stagnant groundwater conditions and that this will be the main safety feature of the concept. In fact, it must be anticipated that it will be difficult to take credit for any containment of the radionuclides by the canister or near-field barriers.

The construction of a repository according to the KBS-3 method will be based on established technology for construction in hard rock. The technology needed for construction of repository based on deep boreholes largely remains to be developed. There is today technology that can be used as a starting point, should it be decided to enter that path. However, the costs for the development will have to be carried by the nuclear industry, since there is no other industry that is interested in so deep and so wide boreholes in crystalline rock.

The methods planned to be used for handling the fuel in the KBS-3 method have been designed to satisfy stringent needs for controllability and verifiability. In disposal in deep boreholes, the conditions are such that the corresponding controllability and verifiability cannot be achieved.

The design of the handling methods in the KBS-3 method is based on experience from other activities where protection against ionising radiation is of importance. This means, for example, that consequences of accidents and mishaps can be restored and repaired. In the process of designing the handling system, the accident analysis plays a central role for assuring the restorability. During disposal in deep boreholes, accidents can happen with consequences that cannot be restored or repaired. This can, for example, be the case when a canister is stuck in the borehole during disposal and broken such that it loses its tightness. The consequence of this could be that a leaking canister is positioned in flowing groundwater without an effective surrounding buffer to hamper the migration of radionuclides.

The safety assessments that have been performed for the KBS-3 method have shown that the repository with the canisters surrounded by a bentonite buffer is resilient against the stresses created by future earth quakes and glaciations. In repository based on the deep borehole principle no or very little protection can be credited if such external stresses occur. Today it is unknown what the consequences would be for the safety of a deep borehole repository at a future glaciation or earth quake.

A repository built according to the KBS-3 method comprises one single nuclear facility. The above-ground facility is small enough to allow the whole facility to be fenced in thus allowing for normal security functions to be installed. At disposal in deep borehole, each borehole in operation will have to be fenced in separately with separate security functions. The number of such sites in operation simultaneously will depend on the time that is allowed for the overall project. If the spent fuel from 40 years of operation is to be disposed of in 20–25 years, it is estimated that 4–8 borehole sites need to be in the construction or disposal phase at any one time.

According to the international rules concerning control and book-keeping of fissile material, nuclear safeguards, an adequate system for this control should be operational until the fissile material is practically irrecoverable. According to IAEA this means that monitoring of a repository for spent fuel against unauthorised movement of the disposed material may be necessary also after closure of the repository. SKB participates in international programmes aimed at defining criteria for how such monitoring should be carried out. It has been claimed that the accessibility of the material would be less in a deep borehole repository than in a KBS-3 repository due to the greater disposal depth. Irrespective of this, theft of nuclear material from a sealed geological repository would be a large-scale operation the hardly could be carried out without discovery in a functioning society.

The KBS-3 method is today sufficiently developed for moving on with an application for a license to construct a facility. SKB estimates that it would take another 30 years of research at a cost of a little more than 4 billion Swedish kronor to bring the knowledge of deep boreholes to such a level that the two concepts can be evaluated at an equal level. Against the background of what has been said above, it is uncertain that such a programme would result in a concept that is safer than the KBS-3 method. Although the uncertainties in the cost estimates are large for disposal in deep borehole, it is likely that a repository built according to that principle will be more expensive to develop, construct, operate and seal than a repository according to the KBS-3 method. Internationally there is currently very little work carried out on the deep borehole concept. All countries with nuclear power and a programme to dispose of the spent nuclear fuel/high-level waste study different types of tunnel-based concepts as their main option.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	11
<b>2</b>	<b>Beskrivning av de jämförda slutförvarskoncepten</b>	15
2.1	KBS-3	15
2.2	Djupa borrhål	17
2.3	Sammanfattning	21
<b>3</b>	<b>Förutsättningar för val av förläggningsplats</b>	23
3.1	Förläggningsplats för KBS-3-förvar	23
3.1.1	Bergets funktion	23
3.1.2	Förutsättningar för att uppfylla bergets funktion	24
3.2	Förläggningsplats för djupa borrhål	24
3.2.1	Bergets funktion	24
3.2.2	Förutsättningar för att uppfylla bergets funktion	25
3.3	Sammanfattning	27
<b>4</b>	<b>Förutsättningar för uppförande, deponering och förslutning</b>	29
4.1	Uppförande	29
4.1.1	KBS-3	29
4.1.2	Djupa borrhål	31
4.1.3	Sammanfattning	34
4.2	Deponering	34
4.2.1	KBS-3	34
4.2.2	Djupa borrhål	35
4.2.3	Sammanfattning	39
4.3	Förslutning	39
4.3.1	KBS-3	39
4.3.2	Djupa borrhål	39
4.3.3	Sammanfattning	40
4.3.4	Sammanfattning	40
<b>5</b>	<b>Kärnteknisk säkerhet vid hantering</b>	41
5.1	Inledning	41
5.2	KBS-3	41
5.3	Djupa borrhål	43
5.4	Sammanfattning	44
<b>6</b>	<b>Långsiktig säkerhet</b>	45
6.1	Inledning	45
6.2	KBS-3	46
6.2.1	Säkerhetsprinciper och barriärfunktioner	46
6.2.2	Referensutveckling och risker	46
6.2.3	Scenarioanalys och risker	49
6.2.4	Resultat från analys av den långsiktiga säkerheten	53
6.3	Djupa borrhål	53
6.3.1	Säkerhetsprinciper och barriärfunktioner	53
6.3.2	Referensutveckling och risker	54
6.3.3	Scenarioanalys och risker	59
6.3.4	Resultat från analys av den långsiktiga säkerheten	59
6.4	Sammanfattning	60
<b>7</b>	<b>Fysiskt skydd, kärnämneskontroll och återtag</b>	61
7.1	Fysiskt skydd	61
7.2	Kärnämneskontroll	61
7.3	Möjligheter till återtag	62
7.4	Sammanfattning	63



<b>8</b>	<b>Ledtider, utvecklingsbehov och kostnader</b>	65
8.1	Ledtider och utvecklingsbehov	65
8.2	Kostnader	66
8.3	Icke-tekniska projektrisker	67
8.4	Sammanfattning	67
<b>9</b>	<b>Diskussion och slutsatser</b>	69
<b>10</b>	<b>Förkortningar</b>	73
<b>11</b>	<b>Referenser</b>	75

# 1 Inledning

I denna rapport redovisas en jämförelse mellan slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle enligt KBS-3-metoden respektive genom deponering i djupa borrhål. Jämförelsen baseras på en genomgång av ett antal centrala frågeställningar. Samtliga dessa är av grundläggande betydelse för valet mellan dessa två alternativa handlingsvägar för att slutförvara använt kärnbränsle.

De frågeställningar som behandlas är:

- förutsättningar för val av förlägningsplats,
- förutsättningar för uppförande, deponering och förslutning,
- kärnteknisk säkerhet vid hantering av inkapslat använt kärnbränsle,
- långsiktig säkerhet för ett förslutet förvar,
- fysiskt skydd och kärnämneskontroll,
- ledtider, utvecklingsbehov och kostnader.

Frågor kring borrhållsteknik i samband med deponering i djupa borrhål behandlas i samband med förutsättningarna för uppförande. Framställningen har begränsats till deponeringen av tillverkade kapslar. Således har kapseltillverkning och inkapslingsprocess lämnats utanför denna studie.

Jämförelsen i denna rapport bygger på KBS-3-metoden på erfarenheterna från drygt 30 års utveckling inklusive den senast publicerade säkerhetsanalysen SR-Can /SKB 2007b/. Den säkerhetsredovisning, SR-Site, som är under utarbetande och som kommer att biläggas de kommande tillståndsansökningarna för uppförande av ett slutförvar enligt KBS-3-metoden har inte varit tillgänglig under arbetet med den föreliggande studien.

Parallellt med utvecklingen av KBS-3-metoden har alternativa metoder studerats både i Sverige och internationellt. Förvarskonceptet djupa borrhål har från slutet av 80-talet och framåt utretts i ett antal studier såväl i Sverige som utomlands, se nedanstående sammanställning av viktigare rapporter i vilka deponering i djupa borrhål belyses ur olika aspekter:

## 1989–1999

- **Juhlin C, Sandstedt H, 1989.** Storage of nuclear waste in very deep boreholes: Feasibility study and assessment of economic potential. Part I Geological considerations. Part II Overall facility plan and cost analysis. SKB TR 89-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- **Claesson J, Hellström G, Probert T, 1992.** Buoyancy flow in fractured rock with a salt gradient in the groundwater. A second study of coupled salt and thermal buoyancy. SKB TR 92-41, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- **SKB, 1992.** Projekt AlternativStudier för Slutförvar (PASS). Slutrapport. Svensk Kärnbränslehantering AB. (Även publicerad på engelska: Project on Alternative Systems Study (PASS). Final report. SKB TR 93-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.)
- **Ekendahl A-M, Papp T, 1998.** Alternativa metoder. Långsiktigt omhändertagande av kärnavfall. SKB R-98-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- **Juhlin C, Wallroth T, Smelie J, Eliasson T, Ljunggren C, Leijon B, Beswick J, 1998.** The very deep hole concept – Geoscientific appraisal of conditions at great depth. SKB TR 98-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.

## 2000–2009

- **Harrison T, 2000.** Very deep borehole. Deutag's opinion on boring, canister emeplacement and retrievability. SKB R-00-35, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- **SKB, 2000.** Systemanalys. Val av strategi och system för omhändertagande av använt kärnbränsle. SKB R-00-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- **SKB, 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.
- **SKB, 2000.** Samlad redovisning av metod, platsval och program inför platsundersökningsskedet [Fud-K]. (Även utgiven på engelska: Integrated account of method, site selection and programme prior to the site investigation phase. SKB TR-01-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.)
- **Nirex, 2002.** Description of long-term management options for radioactive waste investigated internationally. Nirex report N/050, United Kingdom Nirex Ltd.
- **MIT, 2003.** The future of nuclear power: an interdisciplinary MIT study. Boston: Massachusetts Institute of Technology.
- **Chapman N, Gibb F, 2003.** A truly final waste management solution: is very deep borehole disposal a realistic option for high-level waste or fissile materials? Radwaste Solutions, 10, pp 26–37.
- **Smellie J, 2004.** Recent geoscientific information relating to deep crustal studies. SKB R-04-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- **Nirex, 2004.** A review of the deep borehole disposal concept for radioactive waste. Nirex report N/108, United Kingdom Nirex Ltd.
- **Grundfelt B, Wiborgh M, 2006.** Djupa borrhål – Status och analys av konsekvenserna vid användning i Sverige. SKB R-06-58, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- **CoRWM, 2006.** Managing our radioactive waste safely: CoRWM's recommendations to government. CoRWM Doc 700. London: Committee on Radioactive Waste Management.
- **Marsic N, Grundfelt B, Wiborgh M, 2006.** Very deep hole concept. Thermal effects on ground-water flow. SKB R-06-59, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- **Åhäll K-I, 2006.** Slutförvaring av högaktivt kärnavfall i djupa borrhål: en utvärdering baserad på senare års forskning om berggrunden på stora djup. MKG Rapport 1, Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskning.
- **KASAM, 2007.** Djupa borrhål: ett alternativ för slutförvaring av använt kärnbränsle? Rapport från KASAM:s utfrågning den 14–15 mars 2007. Rapport 2007:6, Statens råd för kärnavfallsfrågor.
- **Bjelm L, 2007.** Deponering av kärnavfall i djupa borrhål! Sammanställd på uppdrag av KASAM, med underlag från utfrågningen i Stockholm 14–15 mars 2007. [Online]. Tillgänglig: <http://www.karnavfallsradet.se/sites/default/files/dokument/seminarier/332.pdf>
- **Baldwin T, Chapman N, Neall F, 2008.** Geological disposal options for high-level waste and spent fuel. Report for the UK Nuclear Decommissioning Authority.
- **Beswick J, 2008.** Status of technology for deep borehole disposal. Report for NDA, Contract NP 01185, EPS International.
- **Jackson D P, Dormuth K W, 2008.** Watching brief on reprocessing, partitioning and transmutation and alternative waste management technology – Annual report 2008. NWMO TR-2008-22. Nuclear Waste Management Organization, Canada.
- **Brady P V, Arnold B W, Freeze G A, Swift P N, Bauer S J, Kanney J L, Recharad R P, Stein J S, 2009.** Deep borehole disposal of high-level radioactive waste. Sandia Report SAND2009-4401, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico.

Flera av de utländska studierna av djupa borrhål som har genomförts utomlands har i stor utsträckning baserats på den utformning av konceptet som togs fram av SKB i Pass-studien år 1992. I studierna från USA år 2003 /MIT 2003/och Storbritannien år 2004 /Nirex 2004/ refereras SKB:s arbeten med deponering i djupa borrhål som de mest genomarbetade och kompletta.

I kapitel 2 beskrivs översiktligt ett slutförvar enligt KBS-3-metoden respektive ett slutförvar enligt konceptet djupa borrhål. I kapitel 3–8 behandlas frågeställningarna i listan ovan och i ett avslutande kapitel görs en övergripande jämförelse mellan de båda handlingsvägarnas förutsättningar, att på ett tillfredsställande sätt utgöra en lösning för det slutliga omhändertagandet av Sveriges använda kärnbränsle.

SKB:s uppdrag är att hantera allt använt bränsle som driften av de svenska kärnkraftverken ger upphov till. Programmet måste därför anpassas till aktuella utfall när det gäller återstoden av drifttiden för kärnkraftverken. Från och med år 2007 har huvudscenariot för den beräknade drifttiden för reaktorerna ändrats. Tidigare baserades alla prognoser på 40 års drifttid, vilket gav upphov till 9 600 ton bränsle (räknat som uran), motsvarande 4 500 kapslar utformade för slutförvaring enligt KBS-3-systemet. Planeringen för kärnbränsleprogrammet baseras numera på ett referensscenario där reaktorerna i Ringhals och Forsmark förutsätts ha en drifttid på 50 år och reaktorerna i Oskarshamn 60 år. Det medför att den mängd använt kärnbränsle som ska slutförvaras uppgår till cirka 12 000 ton uran, motsvarande ungefär 6 000 kapslar.

## 2 Beskrivning av de jämförda slutförvarskoncepten

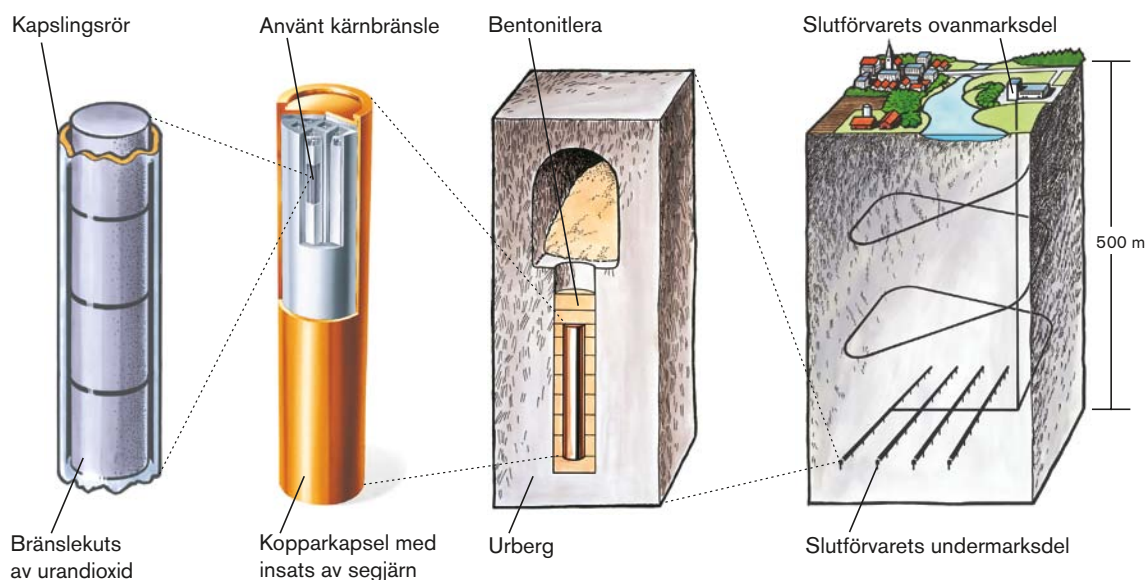
I detta avsnitt jämförs de tekniska utformningarna av ett slutförvar enligt KBS-3-metoden med en möjlig utformning av ett slutförvar byggt på deponering i djupa borrhål. Det bör påpekas att KBS-3-metoden har tagits fram under 30 års utvecklingsarbete, medan det beskrivna konceptet för deponering i djupa borrhål är betydligt mindre genomarbetat.

### 2.1 KBS-3

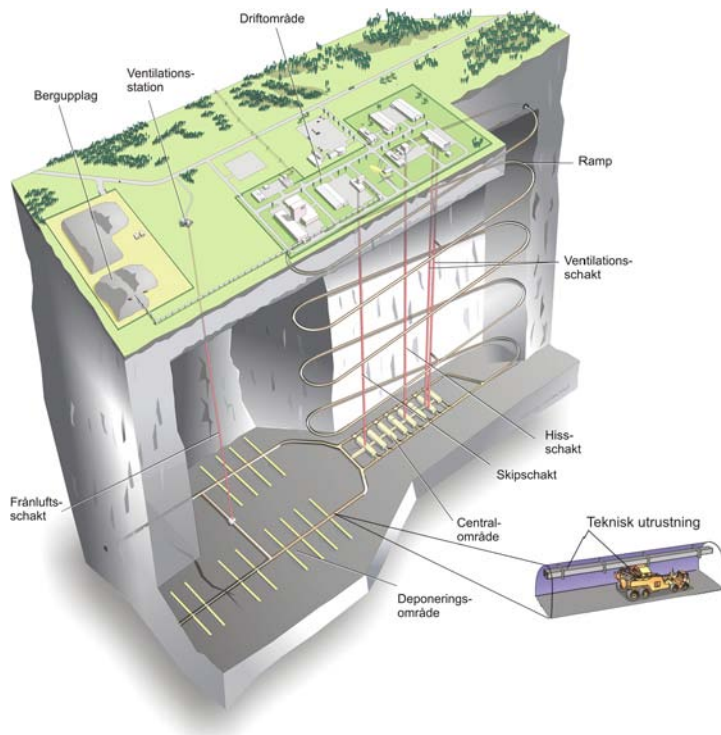
KBS-3-metoden bygger på att det använda bränslet kapslas in i lastbärande segjärns kapslar med ett långtidsbeständigt kopparhölje. Kapslarna deponeras sedan en och en i deponeringshål som borrats i golvet på tunnlar som anlagts på cirka 500 meters djup. Metoden illustreras i *Figur 2-1*. En variant av KBS-3-metoden som utreds är KBS-3H i vilken kapslarna förvaras liggande i horisontellt borrhåll. Jämförelsen i denna rapport utgår dock från vertikal lagring av kapslarna (KBS-3V) då den är mest utredd.

Kapslarna omges i deponeringshålet av en buffert av kompakterad bentonitlera, som har mycket låg vattengenomsläpplighet och som genom sina egenskaper skyddar kapseln mot såväl berggrörelser som korrosionsbefrämjande ämnen i grundvattnet. Tunnlar, schakt och andra förbindelser i berget mellan förvaringsdelen och markytan, kommer att återfyllas och förslutas på ett sätt som anpassas till förlägningsplatsen och till behovet i varje anläggningsdel.

I *Figur 2-2* visas en principiell utformning av en slutförvarsanläggning enligt KBS-3-metoden. Anläggningen består av en ovanmarksdel med ett driftområde som innehåller diverse servicefunktioner, en förvaringsdel under mark och tekniska system. Ovan- och undermarksdelarna förbinds med en transporttunnel, ett skipschakt för transport av massor samt ett hisschakt. Dessutom finns flera ventilationschakt varav vissa mynnar på markytan utanför driftområdet. I *Figur 2-3* visas som ett exempel ovanmarksdelen av ett KBS-3-förvar inlagd på undersökningsområdet vid Laxemar i Oskarshamns kommun.



*Figur 2-1. Principerna för slutförvaring av använt kärnbränsle enligt KBS-3-metoden.*



**Figur 2-2.** Principutformning av en slutförvarsanläggning enligt KBS-3-metoden.



**Figur 2-3.** Ovanmarksdelen av ett KBS-3-förvar inlagd i terrängen vid Laxemar i Oskarshamns kommun som ett exempel (jmf. Exempel på layout för djupa borrhål i Figur 2-5). Clab och kärnkraftverket på Simpevarpsöarna syns i övre högra hörnet.

I det nya referensscenariot med drift av reaktorerna i 50–60 år kommer markbehovet för ovanmarksdelen inklusive ett upplag av utsprängda massor från bygget att vara 0,2–0,3 kvadratkilometer. Undermarksdelen upptar i detta scenario en yta av 3–4 kvadratkilometer och den totala utsprängda bergvolymen är cirka två miljoner kubikmeter i löst mått. En del av dessa massor beräknas komma till användning vid återfyllnaden av anläggningen medan resterande del kan säljas för byggtekniska ändamål. Cirka 300 000 kubikmeter utsprängda massor beräknas behöva mellanlagras ovan mark. Den erforderliga markarealen för detta har uppskattats till 0,04 kvadratkilometer /SKB 2010a/. Efter avslutad drift och förslutning kan marken återställas till naturmark eller användas på annat sätt. I vilket fall kommer sparade massor så långt möjligt att användas.

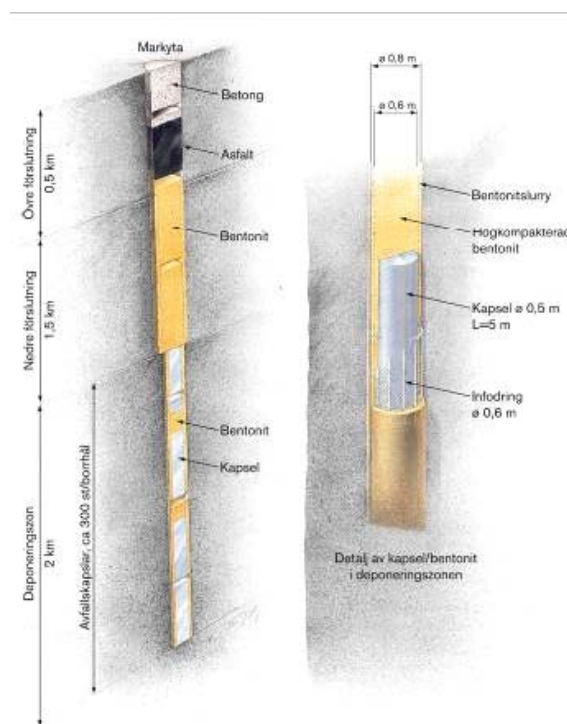
Genom placering av slutförvaret i en långsiktigt stabil geologisk miljö av litet ekonomiskt intresse, isoleras avfallet från människor och yttre miljö och risken för mänskligt intrång minskas. Det betyder att förvaret inte påverkas i högre grad av vare sig samhälleliga förändringar eller av direkta effekter av långsiktiga klimatförändringar på jordens yta. Det använda kärnbränslet omges i slutförvaret av flera tekniska och naturliga säkerhetsbarriärer vars primära funktion är att isolera bränslet. Om isoleringen skulle brytas är barriärernas sekundära säkerhetsfunktion att fördröja ett eventuellt utsläpp från förvaret. Barriärerna är passiva och består av naturligt förekommande material som är långsiktigt stabila i förvarsmiljön.

## 2.2 Djupa borrhål

I konceptet djupa borrhål är det tänkt att inkapslat använt kärnbränsle deponeras på två till fem kilometers djup i vertikala borrhål som borrar från markytan. I det koncept som presenterades i Passstudien /SKB 1992/, kapslas det använda bränslet in i kapslar med en ytterdiameter av 0,5 meter som var och en rymmer fyra bränsleelement från kokareaktorer alternativt ett bränsleelement från tryckvattenreaktorer. Noteras bör att dessa kapslar är mindre än KBS-3-kapslarna och att det därför krävs fler kapslar vid deponering i djupa borrhål än i ett KBS-3-förvar. Kapslarna staplas ovanpå varandra i en deponeringszon mellan två och fyra kilometers djup, se *Figur 2-4*. I ett deponeringshål rymms på detta sätt omkring 300 kapslar vilket innebär att det krävs cirka 60 deponeringshål för att rymma det använda bränslet från referensscenariot med 50–60 års drift av de svenska kärnkraftverken.

Kapslarna omges av en buffert bestående av en blandning av bentonit och en deponeringsslurry. Buffertens funktion är att hålla kapslarna på plats, att motverka transport av strömmande grundvatten i borrhålet samt att ge en fördröjning av transporten av radionuklider som frigörs från kapslar som förlorat sin isolerande funktion.

De övre två kilometrarna av hålet, förslutningszonen, fylls sedan med en kombination av bentonit, asfalt och betong. Borrhålets diameter är 0,8 meter i deponeringszonen och drygt en meter i förslutningszonen. Detta förslag till utformning har flera gånger internationellt refererats som det mest genomarbetade konceptet för slutförvaring i djupa borrhål, se till exempel /MIT 2003, Nirex 2004/



**Figur 2-4.** Principutformning för ett slutförvar enligt konceptet djupa borrhål.

Frågan om alternativa kapselmaterial har kommit upp i diskussionerna kring deponering i djupa borrhål. I *Tabell 2-1* redovisas en sammanfattning av de kapselutformningar som diskuterats och de argument för och emot som framförts. På grund av den aggressiva miljön som råder på stora djup (hög salthalt, högt tryck och hög temperatur), är det osäkert om man skulle kunna säkerställa långa inneslutningstider även med mer kvalificerade kapslingsmaterial. Den kapselutformning som slutligen föreslås i Pass-studien är en kapsel av titan med en betongfyllning. I /SKB 2000/ framförs att underlaget i tidigare rapporter är otillräckligt för att man ska kunna rangordna tänkbara kapselmaterial. Det har således funnits många förslag på kapslingsutformningar, men det har inte varit möjligt att visa att någon av dessa skulle ge långa inneslutningstider i den aktuella miljön.

Vid varje hål behövs utrustning för borrar och iordningställande av hålet, för hantering av borrhålsvätska, för mellanlagring och strålningskärmad hantering av kapslar, för nedföring av kapslar i hålet samt för förslutning. Den yta som krävs för denna hantering har uppskattats till cirka en hektar per hål. Det är osäkert hur nära varandra hålen kan ligga. I tidigare studier har ett avstånd av 500 meter antagits vara tillräckligt med hänsyn till risken för ”kollision” mellan borrhål som avviker från vertikal riktning och till värmeutvecklingen i det deponerade bränslet. Med detta avstånd skulle ett slutförvar som rymmer avfallet från 50–60 års drift av de svenska kärnkraftverken, 60 hål, kräva en sammanlagd yta av drygt 13 kvadratkilometer.

Med modern teknik för aktiv vertikalstyrning av borrar, har man kunnat reducera avvikelserna från vertikallinjen väsentligt. Erfarenheterna av vertikalstyrning från oljeborring är mycket goda och vertikalstyrning av borrar i kristallint berg började utvecklas i samband med ett djupborringsprojekt i södra Tyskland 1990–1994. Det får därför ses som troligt att avståndet mellan hålen skulle kunna minskas väsentligt jämfört med vad som har antagits tidigare. Modeller av eventuella effekter av värmeutvecklingen har visat att hålen kan läggas närmare även med hänsyn till denna /Marsic et al. 2006/. /Brady et al. 2009/ anger att det är osannolikt att hål med ett inbördes avstånd av 200 meter skulle påverka varandra termiskt. Med ett avstånd mellan hålen på 200 meter skulle behovet av markyta reduceras till 2–3 kvadratkilometer. Eftersom varje borrar- och deponeringsplats kräver en anläggningsyta på cirka 1 hektar skulle endast lite orörd mark kunna finnas mellan borrarplatserna vid en så tät borrhålsförläggning.

**Tabell 2-1. Kapselutformningar diskuterade i tidigare studier**

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.
	Kapslingar med alternativa fyllningar av glaskulor, blykulor och torrt cementpulver.	Ej utvärderade.
Pass-studien /SKB 1992/	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.



/Baldwin et al. 2008/ föreslår att flera borrhål borrar från samma borrhålsplats med ett inbördes avstånd av 10-tals meter, varvid arealbehovet kan minskas väsentligt. För att minska växelverkan mellan borrhålen anger man att de skulle kunna borraras med viss avvikelse från vertikallinjen. Detta får anses mindre lämpligt då det försvårar en säker deponering av kapslarna.

Ett slutförvar med 60 hål skulle ge upphov till cirka 400 000 kubikmeter borrhålskav som kommer upp som finmalet berg. Sådant borrhålskav måste sannolikt betraktas som avfall som måste deponeras, då det på grund av sina geotekniska egenskaper saknar värde som byggmaterial. Ett exempel på en layout för ett slutförvar enligt konceptet djupa borrhål med 60 deponeringshål med 500 meters inbördes avstånd såsom det skulle kunna te sig vid Laxemar i Oskarshamns kommun visas i *Figur 2-5*. Var och en av deponeringsplatserna utgör en kärnteknisk anläggning, vilket bland annat medför krav på fysiskt skydd och kärnämneskontroll (se kapitel 7).

Som redovisas i avsnitt 4.2.2 utgör den stora borrhålsdiametern, 0,8 meter, en särskild svårighet. Om man minskar håldiametern måste kapslarna göras mindre med den följd att de skulle rymma mindre mängd bränsle. En praktisk gräns för hur smal en kapsel kan göras sätts av bränsleelementens dimensioner. Dessa skiljer sig mellan de olika typer av bränsleelement som ska hanteras. Ett bränsleelement från en kokareaktor har en maximal vidd av 134 millimeter (diagonalt ~190 millimeter). Om ett sådant element innesluts i en kapsel får denna en ytterdiameter på cirka 0,3 meter och skulle kunna placeras i ett borrhål med diametern cirka 0,4 meter. Ett bränsleelement från en tryckvattenreaktor har en maximal vidd på 214 millimeter (diagonalt drygt 300 millimeter). En kapsel som rymmer ett sådant element får en ytterdiameter på drygt 0,4 meter vilket kräver ett borrhål med en diameter på drygt 0,5 meter.

Med smalare kapslar som var och en rymmer ett bränsleelement går det åt cirka 4 gånger fler deponeringshål än med de kapslar som föreslogs i Pass-studien /SKB 1992/. Genom att det vill säga demontera bränsleelementen och placera de individuella bränslestavarna i kapslarna, kan man öka mängden använt bränsle per kapsel. Detta kan sannolikt genomföras men medför ett extra processteg med fjärrstyrd hantering, risker för missöden och ökad dosbelastning på personal. Det kan nämnas att konsolidering av bränsle har studerats även för KBS-3 och av samma skäl utesluts.



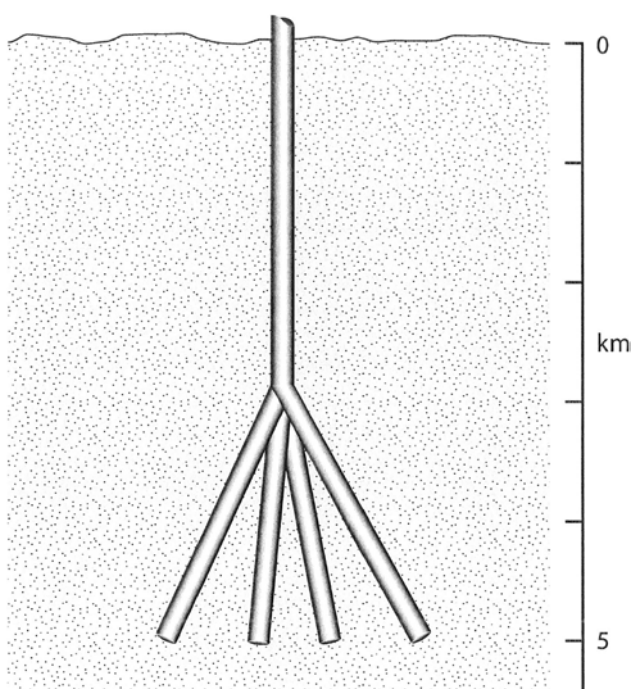
**Figur 2-5.** Exempel på layout för ett slutförvar enligt konceptet djupa borrhål med 60 deponeringshål vid Laxemar i Oskarshamns kommun (jmf. layout för ovanmarksdelen av ett KBS-3-förvar i *Figur 2-3* ).

För att reducera antalet borrhål och därmed det totala arealbehovet, har det föreslagits att borrhålet grenas i ett flertal borrhål på lämpligt djup /Åhäll 2006, Chapman och Gibb 2003/, se *Figur 2-6*. Detta skulle reducera såväl arealbehovet ovan mark som den totala mängden borrhax för deponering. Tekniken att grena borrhål är vanlig i oljeborrningsindustrin där grenhålen oftast får diametern 6½ tum eller 8½ tum (165 respektive 216 millimeter). Förgreningarna är relativt lätta att åstadkomma i lösa bergarter. I hårdare bergarter ökar svårigheterna att åstadkomma en förgrening, eftersom det blir svårt att få tillräckligt tryck på borrhålets borrhax. Likaså ökar svårigheterna med ökande håldiameter på grund av att borrhålets borrhax blir alltför styv. Grenade hål med diametern 6½ eller 8½ tum kan utföras i granit, men inte med hål som är grövre än 12¼ tum (311 millimeter).

Grenade borrhål bedöms vara olämpliga som deponeringshål för använt kärnbränsle på grund av att:

- deponeringshålen blir för smala, eftersom diametern på grenhålen måste göras mindre än stamhålets.
- övergången mellan stamhål och grenhål kan inte förses med foderrör och blir därför känslig för håldeformation och bergutfall.
- styrningen av deponeringen till rätt gren blir komplicerad med flera grenar och många kapslar.
- risken för att kapslar ska fastna i hålet under deponering ökar markant vid grenade hål.

Den primära säkerhetsfunktionen för ett slutförvar för deponering i djupa borrhål är den fördröjning av radionuklider som fås genom att grundvattnet på dessa djup antas vara huvudsakligen stagnant. På grund av de aggressiva kemiska förhållandena (hög salthalt, högt tryck och hög temperatur) och på grund av att det inte går att kontrollera eller verifiera de tekniska barriärernas täthet efter genomförd deponering av det använda bränslet, kan man inte långsiktigt tillgodoräkna sig någon inneslutningseffekt av de tekniska barriärerna.



*Figur 2-6. Förslag på grenat deponeringshål /Åhäll 2006/.*

## 2.3 Sammanfattning

	KBS-3	Djupa borrhål
Arealbehov på ytan	0,2–0,3 km <sup>2</sup>	Drygt 13 km <sup>2</sup> , vid 500 m mellan hålen. Med aktiv vertikalstyrning och termisk optimering av borrhningen kan arealbehovet minskas betydligt.
Utschaktat berg	Ca 2 miljoner m <sup>3</sup> varav en del återanvänds för återfyllning av anläggningen och resten kan användas i bygg- och anläggningsprojekt.	Ca 400 000 m <sup>3</sup> som huvudsakligen utgör avfall och måste deponeras.
Deponering	Ett slutförvar med ca 6 000 deponeringshål. Eftersom deponeringshålen är knappt 10 m djupa kan deponeringsförfarandet lätt kontrolleras.	Slutförvaring i ca 60 hål som borrar från markytan. Även deponeringen sker från markytan genom nedsänkning i 4 km djupa hål. Deponeringen bedöms inte kunna övervakas effektivt.
Primär säkerhetsfunktion	Total inneslutning i tekniska barriärer som skyddas av en stabil och kontrollerbar geologisk och geokemisk miljö.	Fördröjning i berget tack vare de långa transporttider som fås som en följd av stagnant grundvatten. Det stora djupet gör det omöjligt att undersöka miljön i den deponerade kapselns omgivning.

## 3 Förutsättningar för val av förläggningsplats

I detta kapitel beskrivs vilka krav som behöver ställas på förläggningsplatsen för ett slutförvar enligt KBS-3-metoden respektive för ett slutförvar för deponering i djupa borrhål. Vidare beskrivs förutsättningarna för att man ska kunna säkerställa att förhållandena på en tänkt förläggningsplats uppfyller ställda krav. Beskrivningen begränsas till de rent tekniska och geovetenskapliga aspekterna, vilket bland annat innebär att infrastrukturfrågor såsom förutsättningar för transporter etc utelämnats. Dessa aspekter bedöms inte vara av metodskiljande karaktär. Frågor kring acceptans och politisk förankring berörs inte heller.

### 3.1 Förläggningsplats för KBS-3-förvar

#### 3.1.1 Bergets funktion

I ett KBS-3-förvar delas säkerhetsfunktionerna mellan kopparkapseln, bufferten, återfyllningen i deponeringsorterna och den naturliga barriären berget. Inneslutningen av de radioaktiva ämnena i en tät kopparkapsel är en viktig komponent. Kopparkapseln skyddas av den omgivande bufferten av kompakterad bentonit, mot såväl mekanisk som kemisk påverkan. Skulle någon enstaka kapsel förlora sin täthet och tappa sin inneslutande funktion, fördröjer bufferten och berget transporten av radionuklider ut till människan och miljön, så att den radioaktiva avklingningen hinner reducera mängderna av radionuklider till ofarliga nivåer.

Berget på förläggningsplatsen har fyra huvudsakliga skyddsfunktioner nämligen, att ge kemiskt gynnsamma förhållanden, att ge gynnsamma grundvattenströmnings- och nuklidtransportförhållanden, att ge stabila mekaniska förhållanden samt att säkerställa gynnsamma termiska förhållanden. Dessa skyddsfunktioner ska upprätthållas under den tid som förvaret ska skydda omgivningen, det vill säga omkring 100 000 år. Var och en av dessa huvudfunktioner kan brytas ned i ett antal underfunktioner:

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

- Inte innehålla löst syre, det vill säga reducerande förhållanden ska råda.
- Inte ha en alltför hög salthalt för att inte skada bufferten; marginalen är dock stor mellan de salthalter som kan skada bufferten till dem som påträffas på det planerade förvarsdjupet på cirka 500 meter.
- Ha ett tillräckligt innehåll av i första hand kalcium för att förhindra att buffertens gelstruktur löses upp; gränsen går här vid en koncentration av cirka 40 milligram per liter.
- Ha låga halter av ämnen som kan skada kapsel och buffert, såsom kalium, sulfid och järn; inga absoluta gränser går dock att ange.
- Ha ett pH-värde som understiger 11 för att inte bufferten ska ta skada.

För att ge *gynnsamma transport- och grundvattenförhållanden* bör bland annat (det är inte möjligt att ange några absoluta gränser för dessa egenskaper hos berget):

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

För att ge *stabila mekaniska förhållanden* får ett deponeringshål inte korsas av sprickor med större radie än 75 meter för att den maximala skjuvrörelsen vid en eventuell framtida jordbävning inte ska överskrida fem centimeter.

För att ge *termiskt gynnsamma förhållanden* behöver temperaturen i berget överstiga buffertens fryspunkt, det vill säga  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### **3.1.2 Förutsättningar för att uppfylla bergets funktion**

Inom ramen för SKB:s program för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle har ett omfattande arbete med geologiska studier och platsundersökningar bedrivits under drygt 30 år. Undersökningarna bygger på en metodik som utvecklats fortlöpande sedan arbetet påbörjades. SKB har under denna tid byggt upp en stor erfarenhet av den teknik som behövs för att undersöka berget ner till de djup som är aktuella för ett slutförvar enligt KBS-3-metoden, det vill säga i de övre 1 000 metrarna. Den teknik som har utvecklats medger i dagsläget noggranna undersökningar från markytan, eftersom de använda metodernas tillförlitlighet är hög samt borrhings- och undersökningskostnaderna är möjliga att överblicka.

De olika platsundersökningarna kompletteras av den forskning som bedrivs i Äspölaboratoriet. Här genomförs även utveckling och demonstration av bland annat deponerings- och återfyllningsteknik i fullskaliga försök. Genom detta arbete verifieras att deponeringen och återfyllningen kan ske på ett sätt som är kontrollerbart i alla led.

Undersökningarnas inriktning och den använda metodiken har regelbundet stämts av i samband med Strålsäkerhetsmyndighetens, SSM:s (tidigare SKI och SSI), granskning vart tredje år av SKB:s program för ”Forskning, Utveckling och Demonstration (Fud)”. Grundat på bland annat SSM:s utlåtande har regeringen tillstyrkt att arbetet fått fortsätta med SKB:s inriktning på KBS-3-metoden som planeringsförutsättning.

Både SKB och myndigheterna (tidigare SKI och SSI, numera SSM) har oberoende av varandra låtit arbetsgrupper bestående av internationella experter följa arbetet med platsundersökningar och utvärderingar och lämna synpunkter. SKB har vidare tidigt uttalat att det är viktigt att de kommuner där undersökningar genomförs, frivilligt låter SKB arbeta i kommunen. Som ett led i arbetet med att uppnå detta har KBS-3-metoden presenterats i detalj. De två kommunerna som varit föremål för platsundersökningar deltog också aktivt i planeringsarbetet.

De undersökningar som SKB genomfört har visat att det finns lämpliga betingelser för slutförvaring enligt KBS-3-metoden på 400–700 meters djup på ett stort antal platser i den svenska kristallina berggrunden. I juni 2009 beslöt SKB att ta fram ansökningar om tillstånd att få uppföra ett slutförvar enligt KBS-3-metoden vid Forsmark i Östhammars kommun.

Under platsundersökningsskedet har ett mycket stort antal hål borrats i huvudsak i de övre 1 000 metrarna av berget i de båda undersökningsområdena vid Forsmark och Laxemar, och en mycket stor databas med olika typer av undersökningsresultat har byggts upp. När slutförvaret byggs kommer man att från undermarksdelen kunna observera och karakterisera berget i detalj. Man kommer bland annat att kunna karakterisera berget vid varje deponeringshål mycket väl, därmed kommer varje kapsel att omges av berg med väl kända egenskaper. Man kommer dessutom att kunna undvika positioner som inte uppfyller specifikationerna.

## **3.2 Förlägningsplats för djupa borrhål**

### **3.2.1 Bergets funktion**

De förhållanden i berget som är gynnsamma vid slutförvaring i djupa borrhål skulle kunna sammanfattas under samma rubriker som för ett KBS-3-förvar, det vill säga kemiskt gynnsamma förhållanden, gynnsamma transport- och grundvattenförhållanden, stabila mekaniska förhållanden och termiskt gynnsamma förhållanden. På grund av skillnader i anläggningsutförande, förläggingsdjup och deponeringsförfarande kommer de gynnsamma förhållandena dock inte att vara identiska. Nedan beskrivs de viktigaste kraven på berget vid slutförvaring i djupa borrhål.

Slutförvaring i djupa borrhål bygger på att grundvattnet på stora djup förväntas vara i princip stillastående, stagnant, beroende på att ett högt saltinnehåll ger en densitetsskiktning av grundvattnet. Berget bör vara fritt från vattenförande sprickzoner som kan skapa transportvägar till ovanförliggande berg, om de stagnanta grundvattenförhållandena skulle ändras. Det är viktigt att deponeringshålen är raka och runda för att säkerställa att kapslarna kan deponeras på avsett sätt. Detta resulterar i (åtminstone) följande kvalitativa krav på det berg där förvaret ska lokaliseras (kvantitativa krav kan i dagsläget inte preciseras):

- Sammanhängande område med hög salthalt i det djupa grundvattnet.
- Tillräcklig marginal mot påverkan från förväntade förändringar i grundvattenflöden vid nedisning.
- Liten förekomst av konduktiva sprickzoner där grundvatten kan röra sig från förvarsdelen till biosfären.
- Någorlunda isotropa spänningsförhållanden, det vill säga likartade spänningar i olika riktningar. Vid stora spänningsskillnader mellan olika riktningar (anisotropi) riskerar borrhålet att deformeras med bergutfall som möjlig följd.

För att kunna komplettera denna lista med grundläggande krav på berget måste man skapa en bättre kunskapsbas vad gäller förhållandena på stora djup och bland annat bygga upp en konceptuell modell för dessa djup. Detta är i sig självt ett forskningsprogram som kräver avsevärda resurser.

### 3.2.2 Förutsättningar för att uppfylla bergets funktion

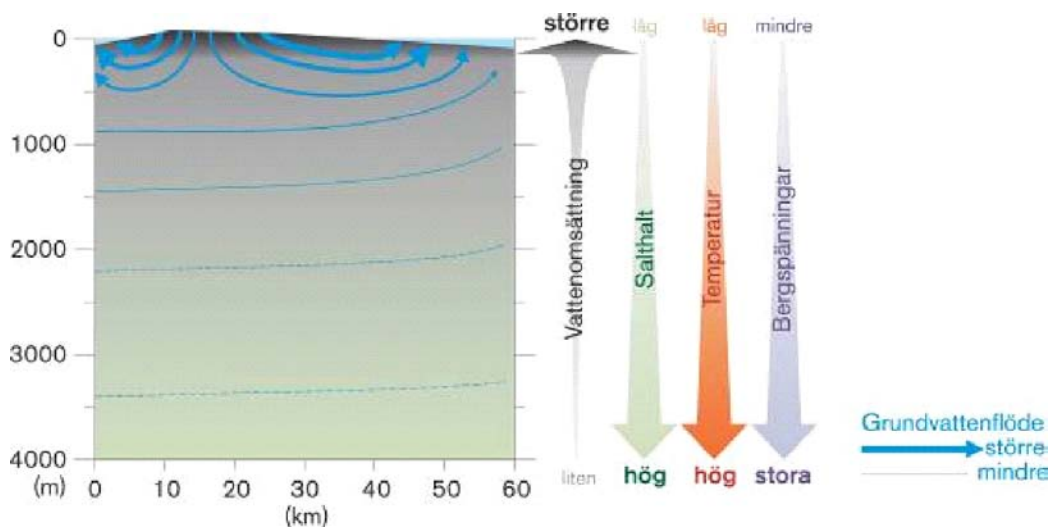
Kunskapsläget beträffande förhållandena på flera kilometers djup i kristallin berggrund har sammanställts av SKB vid flera tillfällen /Juhlin och Sandstedt 1989, Juhlin et al. 1998, Smellie 2004/ baserat på resultaten från djupa borrhål i olika delar av världen.

Kunskapen om de geologiska, geotermiska, hydrogeologiska, geomekaniska och geokemiska förhållandena på stora djup i kristallint berg baseras i huvudsak på information från följande djupa borrhål:

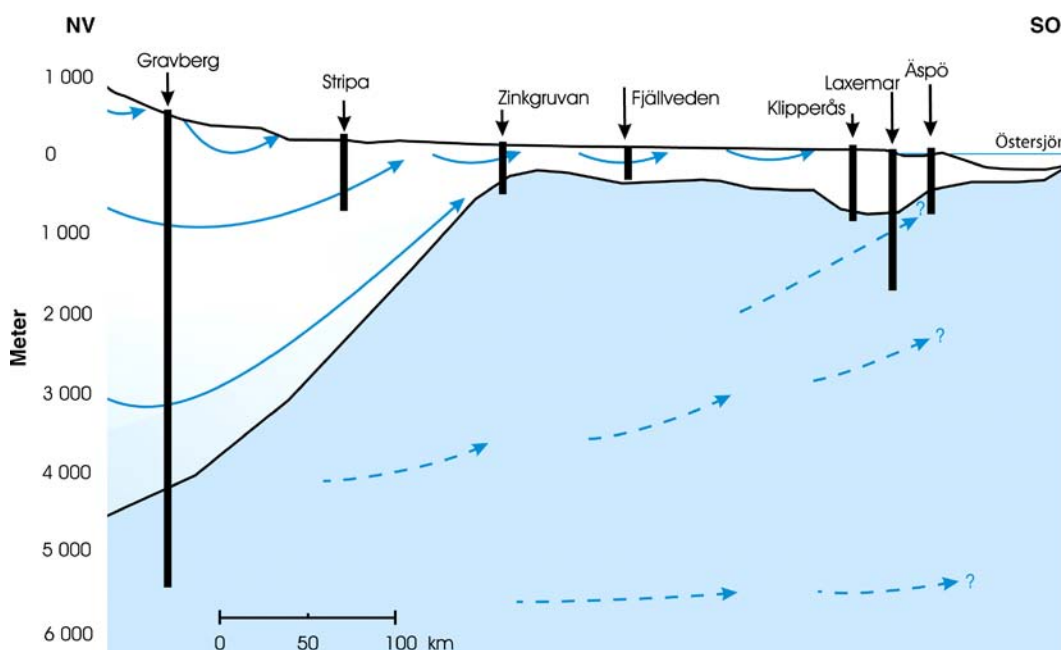
- Kolahalvön – Djupborrhålet SG-3 (12 262 meter).
- Ukraina – Kryvyj Rih (5 000 meter).
- Tyskland – Tyska kontinentala djupborrprogrammet KTB (pilothål 4 000 meter och huvudhål 9 101 meter).
- Dalarna – Provboringar för djupgas Gravberg (6 957 meter) och Stenberg (7 000 meter).
- SKB:s Fud-program, borrhål KLX02 i Laxemar (1 700 meter).

Det kan noteras att av dessa hål är endast hålet på Kolahalvön (SG-3), hålen i djupgasprojektet i Dalarna och Laxemarhålet (KLX02) belägna inom den fennoskandiska urbergsskölden. Dessutom finns det ett 2 516 meter djupt hål som borrats i Outokumpu i Finland för studier av hydrogeologi och grundvattnets salthalt /Kukkonen 2004/. Det fanns dock inga data från detta hål när ovan refererade sammanställningar gjordes. Ett svenskt vetenskapligt program för djup boring, Swedish Deep Drilling Programme (SDDP) initierades 2007. Flera delprojekt har finansierats genom olika forskningsråd och en infrastruktur har byggts upp, men inga resultat som kan bidra till att öka kunskapsbasen för deponering i djupa borrhål föreligger ännu.

En bild av hur några av de relevanta egenskaperna förväntas variera med djupet i berggrunden redovisas i Figur 3-1. En generell modell för grundvattencirkulation och salthaltens variation har föreslagits av /Juhlin et al. 1998/, se Figur 3-2. Denna modell bygger i huvudsak på en kombination av geofysiska mätningar och observationer från ett fåtal djupa borrhål, nämligen Gravberg-1 (Dalarna) och KLX02 (Laxemar) i Sverige, Böttstein i Schweiz och RH-12 i sydvästra England. I borrhålen på Kolahalvön (SG-3) och i Ukraina (Kryvyj Rih) har de rapporterade egenskaperna presenterats som medelvärden över så långa borrhålssektioner att man inte kan se någon trend avseende hur egenskaperna förändras med ökande djup.



Figur 3-1. Relevanta egenskapers generella variation med djupet i svensk berggrund.



Figur 3-2. Vattencirkulation och variationer i salthalt längs en profil från norra Dalarna till östra Småland. (Modifierad från /Juhlin et al. 1998/).

År 2000 presenterade SKB innehåll och omfattning av det Fud-program /SKB 2000/ som skulle behöva genomföras för att möjliggöra en jämförelse av konceptet djupa borrhål med KBS-3-metoden på likartade grunder. Kostnaden för ett sådant program beräknades till då 4,2 miljarder kronor varav cirka två tredjedelar bedömdes vara kopplade till geovetenskapliga undersökningar. I dessa undersökningar ingick inte platsundersökningar med syftet att finna en förläggningsplats.

I /SKB 2000/ konstateras att karakterisering av berget på stora djup kräver metodutveckling. På dessa stora djup måste karakteriseringen av sprickigheten ske i vertikala hål. Detta medför svårigheter att observera vertikala eller nära vertikala sprickor. Karakteriseringen av sprickfördelningen är viktig såväl för analysen av potentiell radionuklidtransport som för bedömning av risken för deformation av borrhålen. Det noteras att bergmekanisk karakterisering av berg på stora djup har utvecklats för sedimentära bergarter inom oljeindustrin, men att metoder saknas för kristallint berg. Det är även osäkert hur de höga bergspänningarna kan påverka andra typer av mätningar på stora djup.

Det stora djup som skulle vara aktuellt vid deponering i djupa borrhål innebär att platskaraktiseringen av praktiska skäl sannolikt måste begränsas till ett fåtal undersökningshål kombinerat med geofysiska mätningar. Den information som man på detta sätt skulle kunna få om den bergvolym som behövs för slutförvaring är begränsad. Man måste därför räkna med att undersökningar i själva deponeringshålen kommer att utgöra en väsentlig del av informationsmängden om förläggningsplatsen. Om man då finner till exempel att salthalten i ett deponeringshål är för låg, så kan detta potentiellt diskvalificera en stor del av förläggningsplatsen.

Man kan vidare notera att berget närmast varje deponerad kapsel inte kan studeras i detalj. Detta förhållande medför att man måste räkna med stora osäkerheter när det gäller den primära säkerhetsfunktionen vid deponering i djupa borrhål.

Eftersom säkerheten vid deponering i djupa borrhål är mycket starkt beroende av förekomsten av stagnant salt grundvatten, måste förekomsten av sådant vatten kunna påvisas med stor säkerhet. Man måste dessutom kunna visa att grundvattensituationen förblir stagnant även efter påverkan från till exempel nedisningar och jordbävningar. Eftersom möjligheterna till heltäckande undersökningar är begränsade, kommer det att finnas väsentliga kvarvarande osäkerheter när det gäller karakteriseringen av grundvattensystemet, även sedan ett platsundersökningsprogram genomförts. Det finns i dag inga möjligheter att med erforderlig säkerhet prognostisera påverkan på det stagnanta salta grundvattnet, på grund av till exempel nedisningar eller jordbävningar.

Det bör understrykas att säkerheten vid deponering i djupa borrhål baseras på andra geologiska förhållanden än vad som gäller vid ett KBS-3-förvar. Detta innebär att informationen från de nu genomförda platsundersökningarna är helt otillräcklig för att bedöma om ett slutförvar för deponering i djupa borrhål skulle kunna anläggas på de undersökta platserna.

### 3.3 Sammanfattning

	KBS-3	Djupa borrhål
Geologiska krav	Stabila mekaniska förhållanden.	Någorlunda isotropa spänningsförhållanden.
Hydrogeologiska och hydrokemiska krav	Reducerande miljö, vattensammansättning som inte skadar bufferten eller kapseln.	Sammanhängande område med grundvatten med hög salthalt. Begränsad förekomst av konduktiva zoner.
Kännedom om berggrunden	Mycket god, genom många års forskning och undersökningar. Möjlighet att i detalj inspektera samtliga deponeringshål.	Bristfällig, få borrhål fördelade över ett stort område, i flera fall i irrelevant geologi. Begränsade möjligheter att i detalj inspektera det berg som omger individuella kapslar.
Undersökningsteknik	Etablerad teknik efter 30 års forskning och tillämpning.	Många undersökningsmetoder måste utvecklas från grunden.
Lokaliseringsarbetet	Har pågått under lång tid. Platsundersökningarna avslutades 2008. Platsval gjordes 2009.	Nya platsundersökningar måste initieras.



## 4 Förutsättningar för uppförande, deponering och förslutning

I detta kapitel diskuteras de tekniska förutsättningarna för uppförande, drift och förslutning av ett slutförvar enligt KBS-3-metoden respektive enligt konceptet djupa borrhål, på en vald förläggningsplats.

### 4.1 Uppförande

#### 4.1.1 KBS-3

I princip kan slutförvaret delas in i utrymmen under mark, byggnader och anläggningar på markytan samt tekniska installationer, se *Figur 4-1*. De olika delarna kommer att byggas ut stegvis. Utrymmena under mark kan delas in i följande anläggningsdelar:

- Ramp (nedfartstunnel).
- Skipschakt (schakt för uppföring av utsprängt berg).
- Övriga schakt (persontransporter, ventilation).
- Centralområde.
- Deponeringsområden.

Följande byggtekniska frågor är av särskild betydelse:

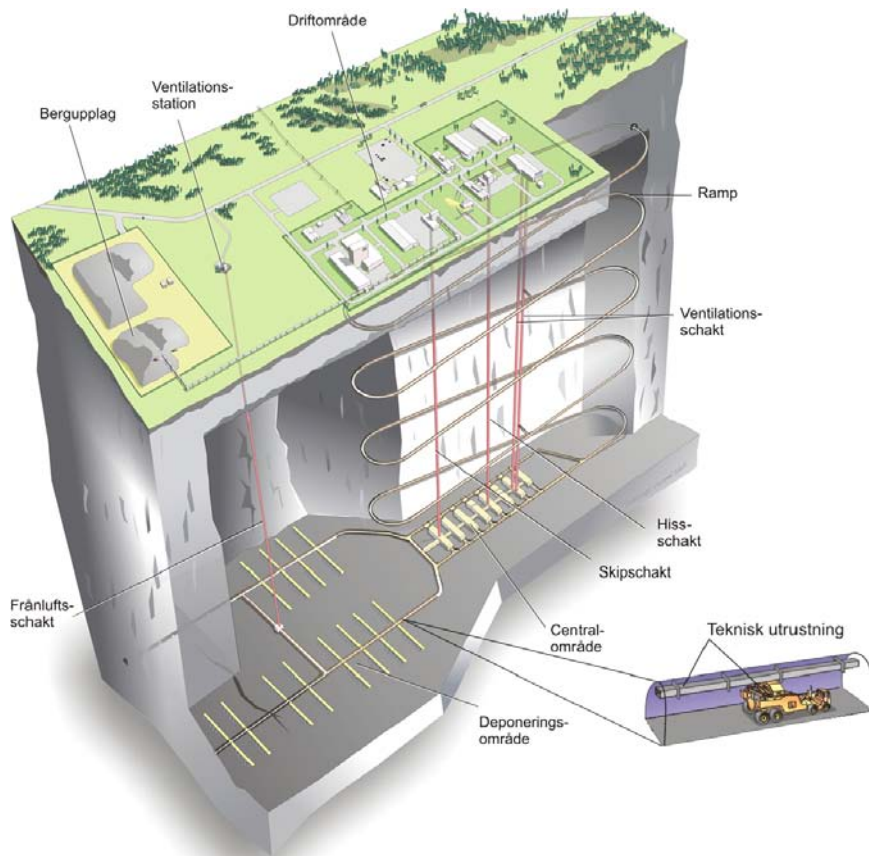
- Den störda zonen runt tunnlar och andra håligheter.
- Behov av plant golv.
- Borring och inspektion av deponeringshål.
- Begränsning av vatteninflöde samt vattenkemiska förhållanden.

Ett välkänt fenomen är att det bildas en mer eller mindre störd zon (EDZ, Excavation Damaged Zone) runt orter och bergrum vid uttag. Hur zonen ser ut beror på om utrymmet sprängs eller borras. Zonens hydrauliska egenskaper kan, om störningen är alltför stor, påverka förvarets funktion på lång sikt. I dag finns kunskap om hur man kan begränsa utbredningen av den störda zonen genom försiktig och kontrollerad teknik för borring och sprängning.

Utveckling av en maskin för uttag av deponeringshål som uppfyller slutförvarets krav pågår. Inledande studier av möjligheterna att använda så kallad omvänd stigortsborring slutfördes under 2008. SKB har erfarenheter av denna teknik från provborring av tre deponeringshål i Posivas undersökningstunnel för VLJ<sup>1</sup>-förvaret för driftavfall i Olkiluoto, Finland /Autio och Kirkkomäki 1996, Autio 1997/, från borring av 17 deponeringshål i Äspölaboratoriet /Andersson och Johansson 2002/ och från borring av långa horisontella deponeringsorter för studier av KBS-3H-varianten i Äspölaboratoriet /Bäckblom och Lindgren 2005/.

För att lösa problemet med vatteninflöde till undermarksanläggningen krävs viss teknikutveckling. På det djupa förvaret ligger är vattentrycket högt. Även små sprickor, eller system av hopkopplade sprickor, leder vatten. Eftersom injekteringsmaterial och metoden för injektering behöver anpassas efter sprickornas och spricksystemens egenskaper, blir frågan komplex ur ett vetenskapligt perspektiv. Dessutom får injekteringsbruket inte ge högre pH än 11 i grundvattnet när det lakas ut för att förvarets långsiktiga funktion inte ska försämrats.

<sup>1</sup> VLJ = VoimaLaitosJätettä (kraftverksavfall)



**Figur 4-1.** Principutformning av ett KBS-3-förvar.

Tester i realistisk miljö av material med lågt pH för tätning av såväl grövre som finare sprickor pågår. En bred utvecklings- och demonstrationsinsats genomfördes i projektet "Fintätning av tunnel" i Äspölaboratoriet. Målen för projektet var att bekräfta att de material som övervägs för injekteringen är lämpliga att använda på förvarsdjup och att bekräfta att det under rådande vattentryck är möjligt att uppnå de täthetskrav som preliminärt ansatts för en deponeringsort. Injektering med olika bruk utfördes i en knappt 100 meter lång tunnel i Äspölaboratoriet. Projektet har gett erfarenheter för förbättring av bland annat injekteringsutrustningen och metoder för uppföljning av injekteringsresultatet. Resultaten behöver tas i bruk och testas i ordinarie anläggningsproduktion.

I *Figur 4-2* redovisas SKB:s bedömning hösten 2007 av teknikutvecklingsstatusen för de olika deltekniker som kan komma att användas vid uppförandet av slutförvaret /SKB 2007a/. Sammanfattningsvis kan man konstatera att uppförandet av ett KBS-3-förvar bygger på känd och beprövad teknik som kan tillämpas i dag, alternativt kan appliceras efter tester och prototypstudier. Teknikutvecklingen kommer att fortsätta med syftet att optimera systemet fram till dess deponeringen inleds.

Man kan konstatera att det i Sverige finns lång erfarenhet av att bygga i berg. Den kunskapen kommer att användas vid karakterisering av berget samt vid allt bergarbete såsom borrhning, sprängning, skrotning och bergförstärkning. Arbetet kommer att utföras med stor precision för att uppfylla de speciella krav som ställs på slutförvaret.

Deponeringsort		Deponeringshål	
Takort	Pall		
Undersökning/ karaktisering	Undersökning/ karaktisering	Undersökning/ karaktisering	Känd och beprövad tillämpning i dag
Injekttering	Injekttering	Borrning av pilothål	Känd och beprövad teknik som kan appliceras
Borrning	Linsågning	Rymning med krona neråt	Känd och provad teknik som kan appliceras efter tester
Laddning	Spräckning	Kaxhantering	Teknik som inte är känd eller tillräckligt utprovad i den tilltänkta användningen
Sprängning	Lastning	Uttag avfasning för strålskärm	
Lastning	Skrotning	Kartering	
Skrotning	Temporär berg- förstärkning (bult)		
Temporär berg- förstärkning (bult)	Kartering		
Kartering	Kontroll av EDZ		
Kontroll av EDZ			
Efterinjekttering			
Permanent berg- förstärkning (sprutbetong, nätning)			

**Figur 4-2.** Redovisning av tekniker som övervägs för bergarbeten i en deponeringsort och i ett deponeringshål i ett KBS-3-förvar samt en bedömning av de olika teknikernas mognad /SKB 2007a/.

#### 4.1.2 Djupa borrhål

En anläggning för deponering i djupa borrhål består av ett stort antal borrhål. I deponeringszonen mellan två och fyra kilometers djup förutsätts dessa ha diametern 0,8 meter. I en tidigare utredning /Harrison 2000/ framfördes synpunkten att man, för att få en ekonomiskt rimlig sjunkningstakt på borrhållningen i denna typ av granitiskt berg, borde använda hammarborrning. Det slogs dock fast att någon sådan teknik inte fanns utvecklad vid denna tidpunkt och att det saknades drivkrafter för att få till stånd en sådan utveckling utanför kärnavfallsprogrammet. I Harrisons utredning noterades också att installationen av de långa, och därför tunga, foderrören som behövs för att säkerställa att hålet hålls öppet för deponering, kräver borrhållningar med stor lyftkapacitet och särskild utrustning i form av domkrafter. Harrison gjorde i sin utredning bedömningen att det vore möjligt att borra deponeringshållen med dagens teknik, men att ett sådant arbete skulle utgöra en av de hittills största utmaningarna för borrhållningsindustrin.

Genom en bred genomgång av borrhållstekniker från diverse projektbeskrivningar, artiklar och många kontakter inom branschen har, som ett led i arbetet med denna rapport, underlag samlats in för en förnyad bedömning och värdering av status för borrhållsteknik med potential att genomföras till de stora djup (4–5 kilometer) och dimensioner (0,8 meter) som diskuterats. Borrhållningsmetoderna kan grovt indelas i kärnborrning, rotationsborrning och hammarborrning. Kärnborrning är begränsad till små dimensioner och därför mest lämpad för borring av undersöknings- och pilothål. Både rotationsborrning och hammarborrning kan användas för borring av hål med stora dimensioner. Hammarborringens

fördel i hårt kristallint berg är att man uppnår en snabb borrhjunkning. En svaghet är att hammarborrningen normalt utnyttjar luft för kylning och transport av borkax istället för borrhålsvätska, vilket bland annat kan leda till problem med borrhålets stabilitet och mycket hög energiförbrukning vid stora djup. Hammarborrning med borrhålsvätska eller vatten har utvecklats de senaste åren och tillämpas med goda resultat. Den tekniken är dock begränsad till mindre håldiameter och har visat sig känslig på större djup. Rotationsborrning framstår därför som den av tillgängliga tekniker som sannolikt har bäst förutsättningar att kunna utvecklas för att framställa deponeringshål för deponering i djupa borrhål. Rotationsborrning är dessutom den metod som använts vid nästan all borring av djupa hål med en diameter över 0,15 meter såväl i kristallint som i sedimentärt berg. För rotationsborrning finns det väl utvecklad teknik för vertikalstyrning, vilket minskar risken för att borrhålet avviker från vertikallinjen.

Det finns i dagsläget en samstämmighet om att det med rotationsborrning med rullkronor skulle kunna vara realistiskt att åstadkomma 4–5 kilometer djupa hål med diameter upp till 0,445 meter medan hål med större diameter ligger utanför vad som i dag kan åstadkommas /Beswick 2008/. Det bör dock noteras att det inte finns någon praktisk erfarenhet av att borra hål med uppemot en halvmeters diameter i kristallint berg. I *Figur 4-3* visas den 83 meter höga borrhigg som användes för borring av ett drygt nio kilometer djupt borrhål i Tyskland. Detta hål hade en diameter av cirka 0,45 meter ner till tre kilometers djup och mellan tre och sex kilometers djup var diametern 0,375 meter.

Med en borrhålsdiameter på en knapp halvmeter begränsas de deponerade kapslarnas diameter till knappt 0,4 meter. Som redovisats i avsnitt 2.2 skulle sådana kapslar kunna rymma ett bränsleelement från en kokareaktor, medan bränsleelementen från tryckvattenreaktorerna är något för stora för att få plats i en sådan kapsel.

En svårighet med att borra grova hål i kristallint berg, är att åstadkomma tillräcklig matningskraft. En rullkrona på 0,445 meter kräver en matningskraft på 450–500 kilonewton (45–50 ton). För större diameter krävs ännu större matningskraft.

En alternativ teknik som har diskuterats är schaktborrning, som kan liknas vid vertikal fullortsborrning. I detta fall tar bormaskinen spjörn mot borrhålsväggen för att åstadkomma tillräcklig matningskraft. Det är okänt om någon teknikutveckling med relevans för slutförvaring pågår inom detta område i dag.



**Figur 4-3.** Borrhigg – UTB-1 GH 300 EG som användes i det kontinentala djupborrningsprogrammet i Tyskland /Harrison 2000/.

Att förse hålet med foderrör och att täta spalten mellan foderröret och berget utgör en särskild utmaning, särskilt i ovala hål med förekomst av bergutfall. Foderrörsektioner är styva och tunga (>500 ton), vilket ställer stora krav på borrhagens lyftförmåga. När man väl har fått foderröret på plats, återstår svårigheten att cementera fast röret. Erfarenheterna från oljeindustrin är dåliga. Man räknar där med att högst hälften av cementeringarna lyckas, och på större djup än 3 000 meter räknar man med en ännu lägre andel lyckade cementeringar.

En möjlighet som diskuterats bland annat av /Juhlin och Sandstedt 1989/ och i Pass-studien /SKB 1992/, är att använda ett perforerat eller gallerformat foderrör som möjliggör att bentonit sväller ut genom foderröret och bidrar till att täta spalten. Det återstår att utvärdera om ett sådant foderrör kan göras tillräckligt motståndskraftigt mot bergutfall och håldeformation för att säkerställa fri passage för de kapslar som ska deponeras. Användning av hela, operförorade, foderrör skulle möjligen öka säkerheten mot deformationer och därigenom säkerheten vid deponering av kapslar. Risken att det då uppstår en spalt mellan foderrör och deponeringshålets vägg ökar emellertid, vilket riskerar att ge upphov till vertikala transportvägar för radionuklider.

Kombinationen att borra både djupt och med stor diameter i kristallint berg är mycket ovanlig och det finns inte i dag någon egentlig drivkraft att ta fram erforderlig teknik. Det fordras ett utvecklingsarbete med samverkan mellan olika kompetenser för att ta fram den. I detta utvecklingsarbete måste även frågeställningar som tillkommer på grund av att det är en kärnteknisk anläggning som ska uppföras tas med.

Några särskilt viktiga slutsatser avseende borrhörtekniken är att:

- Deponeringshålen ska vara vertikala och raka för att minimera problem med att få ner foderrör och kapsel samt för att minimera slitage i samband med deponering.
- Kunskap om de bergmekaniska förhållandena är central för att bedöma möjligheterna att utföra borrhålen enligt de krav som kommer att ställas. I första hand kan bergmekaniska fenomen skapa problem i samband med borrhningen genom att utfall, och stora deformationer kan orsaka fastborrning, avvikelser från den vertikala riktningen och svårigheter att installera styva tunga foderrör. Det har visat sig från flertalet referensprojekt till stora djup, att bergmekaniska fenomen kan orsaka svårbemästrade problem att skapa vertikala och raka borrhål. Den enda möjligheten har många gånger varit att borra ett så kallat side track runt det stället där man har problem.
- Noggranna förberedelser och tester samt kontrollerad styrd borrhning krävs för att minska antalet borrhål som inte kan godkännas.
- Att förse deponeringshålet med foderrör och att sedan täta mellan foderröret och deponeringshålets vägg utgör en särskild utmaning.
- Erfarenheterna visar att man inte bör borra djupare än fem kilometer, om man ska uppnå ett relativt rakt borrhål. Om avsikten är att deponera använt kärnbränsle, så kan det vara tveksamt att gå djupare än fyra kilometer då en ökad risk för bergutfall och ovala hål på större djup minskar förutsättningarna för att borra rakt och få ned kapslarna på ett säkert sätt.

Vid en eventuell utveckling av konceptet djupa borrhål bör teknik som redan finns eller endast behöver modifieras, nyttjas i största möjliga utsträckning. Det är viktigt att utnyttja dagens kunskap hos företag, organisationer och enskilda individer för att göra steget till ett koncept kortast möjligt, för att härigenom minska risktagande och kostnader.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att tekniken att framställa tillräckligt vida och djupa deponeringshål inte finns färdigutvecklad, men att det finns förutsättningar att utveckla sådan teknik. Utvecklingen kommer att ta tid och vara kostsam, eftersom det inte finns några andra kommersiella drivkrafter för en sådan utveckling än ett eventuellt intresse vid avfallsdeponering. På grund av det stora djupet är detaljkaraktiseringen av berget mycket dyr. Man måste därför räkna med att mätningar i pilothål på deponeringshålets plats kommer att ingå i det arbete med den karakterisering av berget som måste genomföras. Detta innebär att deponeringshålen måste anläggas i berg som i stora stycken är okänt när borrhningen av pilothålet startar.

Om man stöter på förhållanden som är ogynnsamma i ett borrhål finns risken att ett helt deponeringshål med sin kapacitet på 300 deponerade kapslar inte kan användas. Upptäckten av till exempel flackt lutande eller horisontella högkonduktiva zoner kan medföra att en stor del av förläggningsplatsen inte kan tas i anspråk, eftersom sådana zoner sannolikt sträcker sig genom flera borrhålslägen. Som exempel kan nämnas att en sprickzon som stupar 60° mot horisontalplanet når fem kilometers djup cirka tre kilometer åt sidan från sin position på markytan, det vill säga den kan förväntas skära igenom hela förvarsområdet.

### 4.1.3 Sammanfattning

De två deponeringsmetoderna skiljer sig väsentligt åt när det gäller byggteknikens mognad.

En KBS-3-anläggning kan uppföras i dag med känd bergbyggnadsteknik. Utgångspunkten är att alla steg i uppförandet av en KBS-3-anläggning kan kontrolleras och verifieras.

Det finns i dag ingen utvecklad och beprövad teknik för uppförande av en anläggning för deponering i djupa borrhål med de för ändamålet önskade egenskaperna. Det bedöms som möjligt att åstadkomma fyra kilometer djupa deponeringshål med en maximal diameter på 0,445 meter. Sådana hål är inte tillräckligt vida för att medge deponering av bränsleelement från tryckvattenreaktorer, och borrning av vidare hål ligger idag utanför borrhålsindustrins erfarenhet.

## 4.2 Deponering

### 4.2.1 KBS-3

En beskrivning av hur deponering enligt KBS-3-metoden kommer att gå till publicerades år 2006 för de båda platserna Laxemar och Forsmark /SKB 2006a, b/. Hanteringen bygger på erfarenheter från hantering av radioaktivt material i andra kärntekniska anläggningar. Den exakta anläggningsutformningen och hanteringen kommer att fastläggas successivt under projekteringen. Kritiska moment i hanteringen, liksom utrustning som tas fram särskilt för slutförvaret, provas och demonstreras i Äspölaboratoriet.

Innan kapslarna placeras i deponeringshålen förses hålen med en buffert bestående av block av kompakterad bentonitlera. Vid tillverkningen av buffertblocken kontrolleras egenskaperna så att bufferten får de egenskaper som är mest gynnsamma både i fråga om mekaniska egenskaper och genomsläpplighet för grundvattnet.

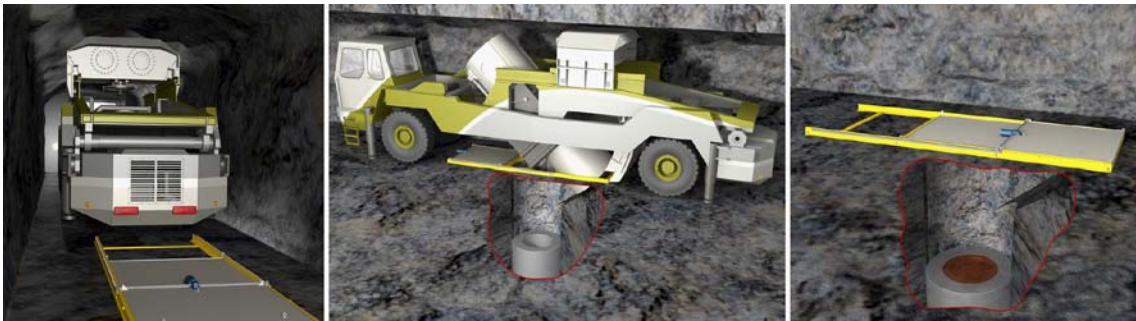
Deponering sker först i det hål som är längst inne i deponeringsorten och avslutas närmast stamtunneln. I sina huvuddrag består hanteringen av inkapslat använt kärnbränsle av följande moment:

- Bränslet transporteras från inkapslingsanläggningen sjövägen, via hamnen i Forsmark, till ovanmarksdelens terminalbyggnad. Transporten sker i en transportbehållare med ett särskilt terminalfordon.
- Transportbehållaren med inkapslat bränsle transporteras ner i berget genom den ramp som förbinder ovanmarksdelen med undermarksdelen. Transportbehållaren ställs upp i en omlastningshall i centralområdet.
- Kapseln med använt kärnbränsle lastas om från transportbehållare till deponeringsmaskinens strålskärmsstub, varefter deponeringsmaskinen körs till deponeringsorten.
- Deponeringsmaskinen placeras över deponeringshålet. Kapseln placeras i deponeringshålet, som i förväg har avsynats och försetts med block av kompakterad bentonit.
- Bentonitblock placeras ovanpå den deponerade kapseln med hjälp av vakuumliftverktyg i en bockkran varefter deponeringshålet försluts med ytterligare bentonitblock och bentonit/bergkross.

I *Figur 4-4* visas en prototyp av deponeringsmaskinen. I *Figur 4-5* visas hur deponeringsmaskinen är tänkt att placeras över deponeringshålet med bentonitbuffert.



*Figur 4-4. Prototyp av deponeringsmaskin med strålskärnstuben i delvis upprest läge.*



*Figur 4-5. Deponering av kapsel i ett deponeringshål som i förväg har försetts med en buffert av högkompakterad bentonit.*

KBS-3-metoden har utformats så att varje steg i deponeringsförfarandet kan kontrolleras och verifieras. Förvarets utformning samt de utvecklade tillverknings- och hanteringsmetoderna säkerställer att kopparkapseln deponeras intakt och är omgiven av en buffert som uppfyller ställda krav. I och med detta kommer initialtillstånden för bufferten och den deponerade kapseln att vara kända. Utvecklingen av teknik för varianten med horisontell deponering (KBS-3H) av kapslarna pågår i Äspölaboratoriet.

#### **4.2.2 Djupa borrhål**

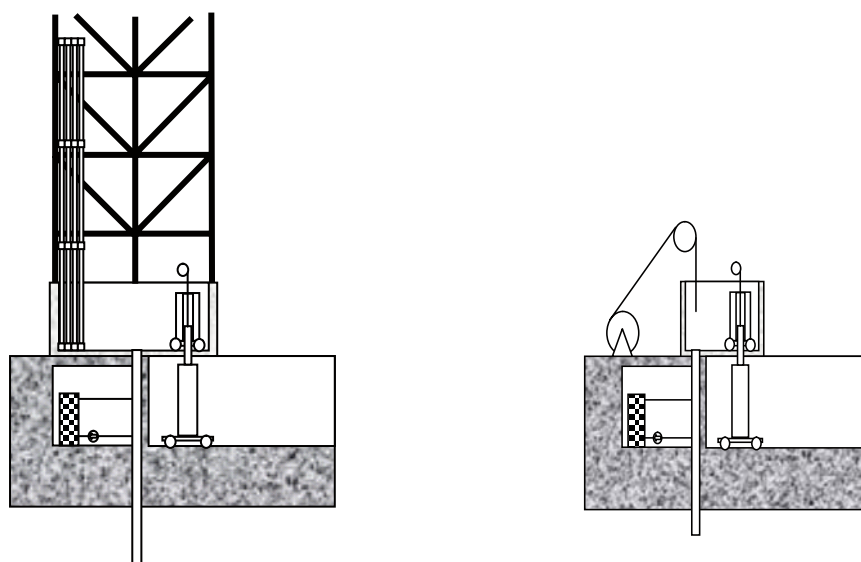
Vid deponering i djupa borrhål måste deponeringen äga rum från ett utrymme i direkt anslutning till markytan. Därefter måste kapslarna sänkas ner mellan två och fyra kilometer genom ett borrhål som är fyllt med någon form av borrhålsvätska, innan de når sin slutförvaringsposition. Borrhålsvätskan är nödvändig, men inte nödvändigtvis tillräcklig, för att stabilisera borrhålet mot bergutfall. Vid deponering byts borrhålsvätskan successivt ut mot en bentonitbaserad deponeringsslurry som ska tjäna som buffert runt den deponerade kapseln. Det är önskvärt att kapseln placeras centrerat i hålet för att ge förutsättningar för deponeringsslurryn att ge kapseln avsett skydd.

/Harrison 2000/ föreslog att deponeringen skulle genomföras med samma rigg som använts till borrhning av deponeringshålet genom att borrarsträngen förses med ett gripverktyg. I senare genomgångar har som alternativ framförts deponering genom nedsänkning med wire eller så kallad coiled tubing, som är ett slankt rör som ligger upprullat på en trumma och kan sänkas ner och tas upp ur ett hål betydligt snabbare än en borrarsträng. Coiled tubing finns i dag i längder på 4–6 kilometer och diametrar upp till 92 millimeter. Sådana utrustningar finns med tillräcklig lastbärande kapacitet (strängens egenvikt plus kapselns vikt) för att deponera kapslarna. I *Figur 4-6* visas skisser på hur deponeringsanläggningen skulle kunna anordnas vid deponering med borrhigg respektive med wire eller coiled tubing.

Oavsett vilken deponeringsmetod som väljs, är följande frågeställningar av central vikt för att deponeringen ska kunna genomföras med den säkerhet som krävs:

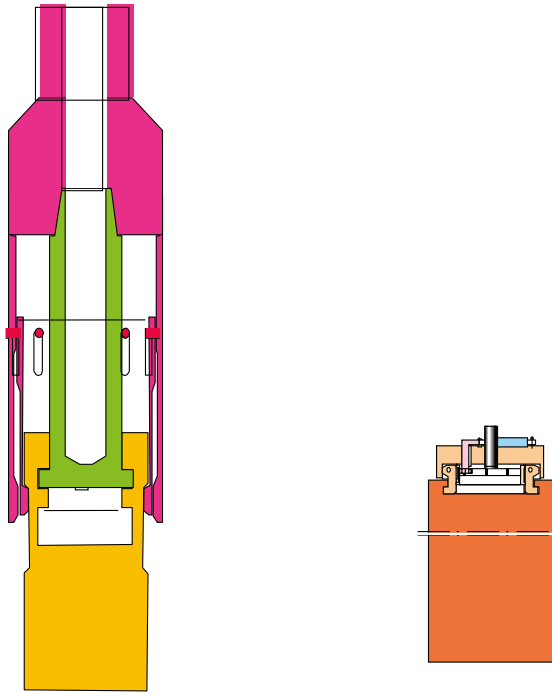
- Borrhålen måste vara vertikala och raka för att minimera risken för att kapseln fastnar, för att undvika att kapselns utsida och/eller borrhålets väggar skadas genom slitage eller för att det vid nedsänkningen inte ska uppstå onödig belastning på kapseln. (Behovet av raka och vertikala borrhål har berörts tidigare i denna rapport.)
- Gripverktyget måste vara utformat med hög säkerhet mot att tappa kapseln och så att man fjärrstyrt kan greppa kapseln för att korrigera läget på kapslar som hamnat snett, kört fast eller av något annat skäl kräver korrigering.
- Kapselns position i vertikalled måste kunna bestämmas med hög noggrannhet under och efter nedsänkningen.
- Det måste klargöras om foderrör och kapslar kan deformeras av laster från berg rörelser.

I *Figur 4-7* redovisas två alternativa gripverktyg som har föreslagits varav det vänstra (Jteted J-slot running tool) föreslagits av /Harrison 2000/ för användning vid deponering med borrhiggen. Det högra liknar det som används vid demonstrationer av deponeringstekniken för KBS-3 i Äspö-laboratoriet och skulle kunna anpassas till deponering med wire eller coiled tubing. Vid deponering med borrhiggen begränsas styrningen av kapseln till tre grundläggande funktioner: sänkings- och hissningsrörelse, vridningsrörelse samt flöde eller tryck genom borrarsträngen.



*Figur 4-6.* Skiss av anläggning för deponering med borrhigg (vänster) respektive med wire eller coiled tubing (höger).





**Figur 4-7.** Alternativa gripverktyg för deponering av kapseln (gul respektive orange) i djupa borrhål. Verktöget till vänster har föreslagits av /Harrison 2000/ för deponering med borrhigg. Verktöget till höger är en anpassning av demonstrationsverktöget från Äspö till deponering med wire.

Det gripverktyg som föreslagits av Harrison utnyttjar sänkning/hissning och vridning för att koppla i och ur greppet om kapseln. Detta kräver stor precision i lägesbestämningen och ska dessutom genomföras i en miljö där kapseln omges av en bentonitbaserad deponeringsslurry, som är ett mycket halt material. Vid deponering med wire finns det möjlighet att med kabel överföra elektriska signaler till gripverktyget. Detta utnyttjas i det verktyg som återges till höger i *Figur 4-7*, där gripklorna manövreras med elektriskt styrda hydraulcylindrar eller motorer. Signalöverföringen kan också ske med pulserade signaler genom borrhålsvätskan.

Lägesbestämning av kapseln är viktig både för styrningen av deponeringsförloppet i stort och för att kunna avgöra när man ska frigöra kapseln från gripverktyget. Ett normalt sätt att avgöra om kapseln har nått avsedd position skulle kunna vara att mäta när lyftkraften i deponeringsanordningen minskar. En kapsel med använt kärnbränsle av den typ som föreslogs i Pass-studien /SKB 1992/ väger cirka fem ton. Vid deponering med borrhiggen kan borrhängens egenvikt enligt olika uppgifter emellertid uppgå till mellan 100 och 1 000 ton. Den avlastning som fås på lyftmaskineriet är således relativt liten i förhållande till borrhängens egenvikt. Om man kör ner kapseln för långt finns det en risk att en stor del av borrhängens egenvikt kommer att belasta kapseln, med följd att skador uppstår på denna.

Lägesbestämningen kompliceras ytterligare av att borrhängen förlängs, dels på grund av den töjning som fås av egenvikten, dels på grund av att den värms upp av borrhålsvätskan som antar bergets temperatur. Detta problem blir större ju längre borrhängen är och ju högre temperatur man har i borrhålet. Som exempel kan nämnas att i det 9 101 meter djupa KTB-hålet i södra Tyskland, korrigerades djupläget med 15 meter på grund av mekanisk töjning och med 28 meter på grund av temperaturhöjningen. Det bör då noteras att temperaturen på de aktuella djupen i svensk berggrund (ner till 4 000 meter) kan förväntas vara i storleksordningen 60–80 °C, att jämföras med de cirka 250 °C som rådde i botten på KTB-hålet. Detta innebär att den nödvändiga temperaturkorrigeringen i ett svenskt borrhål med djupet 4 000 meter kan förväntas vara betydligt mindre än det som uppstod i KTB-hålet, men ändå tillräckligt betydande för att orsaka problem. Deponeringshålets grövre dimension jämfört med KTB-hålet medför dock att korrigeringen på grund av borrhängens egenvikt kan förväntas bli större än i KTB-hålet.

Vid deponering med wire eller coiled tubing blir det förhållandevis enklare att bestämma kapselns läge. Töjningen på grund av egenvikten kan förväntas bli mindre, än vid deponering med borrhög, medan problemet med värmeutvidgning är likartat. Den last som kapseln riskerar att utsättas för, är bara den del av egenvikten hos wiren respektive tuben som motsvaras av de sista metrarna, eftersom resten av vikten förblir hängande i hissanordningen. Vid båda deponeringsmetoderna kan man utnyttja loggning av foderrörsskarvar som referens för positionsmätningar, vilket avsevärt ökar precisionen.

Om en kapsel fastnar och skadas kan man hamna i ett läge där en skadad kapsel sitter fast ovanför deponeringszonen på ett mindre djup än avsett och utsätts för strömmande grundvatten. Det finns i detta läge små möjligheter att säkra situationen på ett tillfredsställande sätt, varför den potentiellt kan vara allvarlig. Skadade kapslar kan även ge upphov till kontaminerade verktyg och kontaminerad borrhålsvätska, som man kan komma att behöva hantera på deponeringsplatsen. Likaså kan ett kontaminerat borrhål sannolikt inte rengöras, utan måste förslutas och överges.

Tidsåtgång för deponeringen i djupa borrhål beror dels av den tid som krävs för sänkning och hissning av kapslar, dels av hur många kapslar som sänks ned samtidigt. Det finns i dag inga underbyggda data för hur snabbt kapslar kan föras ned och verktyget dras upp. Det har bedömts att hastigheten kan hållas högre vid användning av coiled tubing, än om en borrhög används. Hastigheter på i storleksordningen 500 meter per timme har nämnts vid användning av borrhögen. Det skulle i så fall innebära att det skulle ta åtta timmar att nå ett djup på 4 000 meter och lika lång tid att hissa upp gripverktyget. För att uppnå samma deponeringstakt som motsvarar den som eftersträvas för KBS-3, det vill säga en KBS-3-kapsel eller tre kapslar för djupa borrhål per dygn, skulle det således för djupa borrhål krävas att tre kapslar förs ned per dygn, vilket skulle kräva antingen deponering i flera hål parallellt eller skiftarbete.

För att uppnå en jämn takt vid deponeringen krävs att nya hål borrar samtidigt som deponering pågår i redan borrade hål. Antalet borr-/deponeringsplatser som behöver vara i drift samtidigt beror av hur lång tid man tillåter deponeringen att ta. För att klara av deponeringen av det använda bränslet från 50–60 års drift under 40–50 år, det vill säga under lika lång tid som deponering förväntas pågå i ett KBS-3-förvar, har det uppskattats att borrning/deponering behöver pågå i 4–8 hål samtidigt vid drift endast på dagtid.

På deponeringsdjup omges kapslarna i borrhålet av en buffert av lera som ska skydda kapslarna såväl mekaniskt som kemiskt. Det skydd som fås är starkt beroende av den densitet och svällförmåga som bufferten får. Det finns ett samband mellan densiteten hos svällande leror och deras svälltryck och konduktivitet.

Bentonit måste ha en mycket hög densitet för att dess svällningsförmåga inte ska minska påtagligt vid höga salthalter /SKB 2000/. Användning av en kompakterad buffert ger dock upphov till problem vid kapseldeponeringen. Vid deponering i djupa borrhål kan man inte applicera en torr buffert som med tiden vattenmättas eftersom deponeringshålen initialt är fyllda med grundvatten eller borrhålsvätska. I stället är huvudförslaget att fylla den nedre delen av borrhålet med en deponerings-slurry av bentonit och att föra ner högkompakterade bentonitblock mellan kapslarna. Vattenhalten i deponeringslurryn och den högkompakterade bentoniten ska sedan utjämnas (konsolideras) med tiden så att en homogent trycksatt bentonitmassa med önskad täthet fås.

Det material som är föreslaget som huvudalternativ för bufferten är bentonit /Juhlin och Sandstedt 1989, SKB 1992/, även om man i /SKB 2000/ anser att bentonit inte är det självklara valet. Det bör också noteras att man vid deponering i djupa borrhål inte har någon möjlighet att verifiera buffertens egenskaper under eller efter deponeringen och att sådana block av högkompakterad bentonit som avses användas i KBS-3 riskerar att brytas sönder och lösas upp om de trycks ner genom vätska utan kemiskt och mekaniskt skydd. Initialtillstånden för bufferten och den deponerade kapseln kommer inte att vara kända och inte att kunna inspekteras. Kunskap om dessa initialtillstånd utgör en viktig bas för analysen av den långsiktiga säkerheten.

I samband med att kapslarna förs ner i borrhålet finns det flera moment som innebär risk för skador på kapslarna, med ett eventuellt läckage av radionuklider som följd. Det är inte heller säkert att kapslarna hamnar någorlunda centrerat i hålet. På det djup där kapslarna ska deponeras råder förhöjda temperaturer och en hög salthalt i grundvattnet. Denna miljö är aggressiv mot såväl kapsel som deponeringslurry. Av detta följer att det är svårt att bedöma vilken livslängd en kapsel kommer att ha.

### 4.2.3 Sammanfattning

I en KBS-3-anläggning kan det använda bränslet deponeras på ett i alla avseenden kontrollerat och verifierbart sätt. Teknik för att åstadkomma en buffert av önskad kvalitet och för att placera kapsel i deponeringshålet på avsett sätt tas fram och utprovas under realistiska betingelser inom SKB:s program. En prototyp av den utrustning som avses användas för deponeringen har tagits fram.

Teknik för deponeringen av kapslar med använt kärnbränsle på 2–4 kilometers djup saknas i dag. Det finns flera idéer om vilken teknik som skulle behöva utvecklas. Det finns dock grundläggande svårigheter med alla dessa tekniker som medför risker för att kapslar fastnar i hålet eller på annat sätt skadas i samband med att de förs ner i deponeringshålet. Det får betraktas som uteslutet att man skulle kunna kontrollera tätheten hos en deponerad kapsel eller de hydrologiska och geokemiska förhållandena i kapselns närzon efter deponering.

## 4.3 Förslutning

### 4.3.1 KBS-3

Utveckling av förslutningsteknik för KBS-3-metoden pågår för närvarande. Enligt planer kommer förslutningen att påbörjas när allt använt kärnbränsle har deponerats. I princip genomförs förslutningen i omvänd ordning jämfört med utbyggnaden. Installationer och hjälpsystem används så långt möjligt under återfyllning och förslutning av utrymmen i undermarksdelen. I slutskedet kommer behov av tillfälliga system att uppstå, exempelvis ventilation, då de permanenta systemen rivits. Installationer och byggnadselement rivs och transporteras upp till markytan för att reducera förekomsten av organiskt material, betong, metaller med mera i utrymmen i närheten av det använda kärnbränslet.

Återfyllnadsmaterialet antas vara en lera med lämpliga egenskaper. Pluggning på deponeringsnivå samt på lägre nivå i schakten och rampen görs för att begränsa grundvattenrörelser i förvaret. Pluggning i rampens och schaktens mynnningar mot markplanet görs för att försvåra obehörigt intrång.

Återfyllnad och förslutning utförs i stora drag i följande ordning:

- Deponeringstunnlarna återfylls successivt när alla deponeringspositionerna i en tunnel är utnyttjade.
- Stamtunnlarna och transporttunnlarna i deponeringsområdet återfylls och pluggas när allt använt bränsle är deponerat.
- Frånluftsschaktet återfylls upp till markytan och pluggas, frånluft evakueras därefter via rampen.
- Skip, hissar och övriga installationer i schakten demonteras, skip-, hiss- och ventilationsschakten återfylls och pluggas.
- Samtliga utrymmen i centralområdet återfylls.
- Rampen återfylls och pluggas.
- Undersökningsborrhålen försluts.

Tunnlar, ramper och schakt kan på detta sätt återfyllas och förslutas på ett övervakat och kontrollerat sätt. Eventuella svagheter och sprickzoner i berget kan identifieras visuellt och tätas efter behov.

### 4.3.2 Djupa borrhål

Efter slutförd deponering ska de djupa borrhålen förslutas. Förslutningen ska uppfylla de dubbla syftena att erbjuda radiologiskt skydd genom att förhindra tillträde till det deponerade bränslet och att bidra till hydraulisk isolering av deponeringszonen. I det koncept som togs fram i Pass-studien /SKB 1992/ föreslogs att man skulle dela in de övre två kilometrarna av hålet i en nedre förslutningszon mellan 500 meters och två kilometers djup och en övre zon däröver. Den nedre zonen skulle förslutas med block av kompakterad bentonit omgivna av en bentonitlurry, medan den övre zonen skulle tätas med en kombination av asfalt och betong. Tätning av den uppspruckna zonen runt borrhålet föreslogs ske genom utfräsningar i hålväggen som fylls med bentonit.

Det finns i dag ingen teknik utvecklad för att föra ner bentonitblock genom ett borrhål som är fyllt med borrhålsvätska. Block av kompakterad bentonit är känsliga för skador på grund av uppluckring i borrhålsvätskan och på grund av den friktion som uppstår när man för ner blocken. En möjlig utvecklingsväg skulle kunna vara att föra ner bentonitblocken i någon form av kapsel från vilken blocket sedan trycks ut. Eftersom denna operation ska göras många gånger måste den teknik som utvecklas vara mycket robust.

Förslutningen liksom tätningen av den uppspruckna zonen runt borrhålet bör kunna kontrolleras. Teknik för detta saknas i dag.

Utöver deponeringshålen måste även undersökningsborrhål inom området förslutas. Dessa kommer sannolikt att vara både djupare och vidare än undersökningsborrhålen i KBS-3. Huruvida detta ställer särskilda krav på förslutningsåtgärderna är inte utrett.

### 4.3.3 Sammanfattning

En KBS-3-anläggning återfylls och försluts efter avslutad deponering. Metoder för att på ett helt kontrollerat sätt återfylla och försluta anläggningen utvecklas och utprovas under realistiska betingelser inom SKB:s program. De första testerna gjordes i Stripa. Omfattande tester och fullskaleförsök har senare genomförts i Äspölaboratoriet.

Djupa borrhål måste förslutas från markytan. Det saknas i dag teknik för hur denna förslutning ska kunna åstadkommas. Det saknas även teknik för att kontrollera resultatet av förslutningen.

### 4.3.4 Sammanfattning

	KBS-3	Djupa borrhål
Uppförande	Teknik har utvecklats under många år.	Teknik för borrhållning av vida hål i granitiskt berg på stora djup finns inte, men kan möjligen utvecklas.
Deponering	Från tunnlar på cirka 500 m djup. Deponeringshålen är mindre än 10 m djupa, vilket ger observerbar, kontrollerbar och verifierbar deponering.	Från markytan. Hålen flera kilometer djupa, ger mer eller mindre okontrollerad deponering. Initiala kapselskador och kapslar som fastnar på fel nivå i hålet kan inte uteslutas.
Förslutning	Teknik har utvecklats under många år. Sker på övervakat och kontrollerat sätt.	Från ytan. Teknik saknas i dag för förslutning, kontroll och verifikation. Förslutningsteknik kan möjligen utvecklas.

## 5 Kärnteknisk säkerhet vid hantering

### 5.1 Inledning

Ett slutförvar för använt kärnbränsle är en kärnteknisk anläggning. På sådana ställs särskilda säkerhetskrav som syftar till att skydda människor (anställda, kringboende och besökande) och naturen från skadliga effekter av joniserande strålning. För kärntekniska anläggningar ska säkerhetsredovisningar upprättas i samband med att tillstånd söks för uppförande, drift och avslutande av drift. Vidare ska tillståndsinnehavare med högst tio års mellanrum redovisa en återkommande helhetsbedömning av anläggningens säkerhet (SSMFS 2008:1 4 kap. 4 §). I denna bedömning ska redovisas på vilket sätt anläggningen vid bedömningstillfället uppfyller gällande säkerhetskrav och om förutsättningar finns för säker drift fram till nästa bedömningstillfälle, med hänsyn tagen till den utveckling som skett inom vetenskap och teknik.

För normal drift gäller att anläggningen ska leva upp till de krav som ställs i olika lagar, förordningar och föreskrifter. Anläggningen förväntas även leva upp till sådana krav som ställs av andra intressenter inklusive berörd allmänhet. Även om kravbilden är komplex så finns det i dag god erfarenhet och kunskap om hur den ska kunna uppfyllas. Utgångspunkterna för kraven kan för båda förvarskoncepten sammanfattas i följande punkter:

- Krav utgående från kärntekniklagen och strålskyddslagen med tillhörande förordningar och föreskrifter.
- Krav utgående från annan lagstiftning, främst miljöbalken och arbetsmiljölagen.
- Krav utgående från internationella överenskommelser.
- Krav på utrustning av betydelse för säkerheten, till exempel utrustning för aktivitetsmätning, ventilationsutrustning och hanteringsmaskiner för kapslarna.
- Funktions- och redundanskrav.
- Kvalitetskrav på utrustning av betydelse för driftsäkerheten.
- Övriga säkerhetskrav såsom för brandsäkerhet, kriticitet, skydd mot yttre händelser samt krav på fysiskt skydd och kärnämneskontroll.

Fysiskt skydd och kärnämneskontroll beskrivs i kapitel 7.

I detta kapitel diskuteras säkerheten vid hantering av använt kärnbränsle i ett KBS-3-förvar respektive vid deponering i djupa borrhål.

### 5.2 KBS-3

Under hanteringen i slutförvaret är det använda bränslet inneslutet i täta kapslar som har avsynats så att de inte har någon ytbeläggning av radioaktiva ämnen. Man ska därför inte behöva riskera någon luftburen radioaktivitet i de lokaler där kapslarna hanteras. Under en stor del av hanteringen är kapslarna dessutom inneslutna i transportbehållare, som med god marginal uppfyller de krav på strålskärning som krävs för transport på allmän väg. Det är endast vid de tillfällen som kapslarna tas ut ur transportbehållarna som högre stråldoser kan uppstå i omgivande utrymmen. Vid dessa tillfällen sker därför hanteringen i särskilt utformad strålskärmande utrustning som är fjärrstyrd.

Genom att ingen luftburen aktivitet som har sitt ursprung i det använda bränslet kommer att föreligga, kommer heller inga utsläpp av sådan aktivitet att ske till omgivningen under driftskedet. Vissa utsläpp av radon förutses dock. Radonet har sitt ursprung i bergets naturliga innehåll av uran. Genom de undersökningar som kommer att företas före och under uppförandet av slutförvaret kommer information om aktuella radonhalter att erhållas. Dessa kommer att utgöra dimensioneringsunderlag för ventilationsanläggningen så att en säker arbetsmiljö kan garanteras i anläggningen. Radonet ger inte upphov till någon dosbelastning utanför anläggningen.

I samband med hanteringen förutses vissa områden bli klassade som så kallat kontrollerat område, vilket innebär att tillträdet begränsas. De regler som gäller för zonindelning och tillträdesbegränsning i svenska kärntekniska anläggningar framgår av *Tabell 5-1*. För en god kontroll över verksamheten och stråldoserna till personalen utgör följande anläggningsdelar kontrollerat område:

- Terminalbyggnaden i ovanmarksdelen, som utgör uppställningsplats för transportbehållare.
- Omlastningshallen i undermarksdelen, då omlastning pågår.
- Deponeringsorter då deponering pågår. När alla kapslar i en ort deponerats och deponeringshålens övre del fyllts med bentonitblock förutses orterna kunna återgå till icke kontrollerat område.

Utrymmena kommer att tilldelas en strålningsklass som beror av den stålningnivå som förväntas.

I underlaget till ansökningarna om tillstånd att uppföra ett slutförvar kommer en utförlig analys av såväl säkerheten under normal drift, som riskerna för störningar och missöden som kan leda till ökade strålnivåer att presenteras. Följande störningar diskuteras i samband med de säkerhetsanalyser som genomförs:

- Fel i hanteringssystem.
- Kriticitet.
- Brand.
- Fel i försörjningssystem.
- Påverkan från bergarbeten.
- Yttre påverkan.

Information om de identifierade störningarna används för att utforma anläggningen och hanteringen, så att inga missöden ska behöva leda till utsläpp av radioaktiva ämnen. Nedan följer några exempel på hur detta kan ske.

Vid omlastning av kapseln från transportbehållaren till strålskärmsstuben är lyfthöjden begränsad till omkring fem meter. Om kapseln tappas från denna höjd finns det viss risk för att den skadas och behöver återsändas till inkapslingsanläggningen för kontroll. Kapseln är emellertid utformad så att inga aktivitetsutsläpp ska ske vid ett sådant missöde. Eventuell felaktig lyftutrustning kan i detta läge bytas ut utanför det område som berörs av strålningen från kapseln så, att vistelsetiden för personalen i omlastningshallen kan begränsas. I samband med åtgärder för att återställa efter en tappad kapsel kan direktbestralning ge vissa stråldoser till personalen.

Trots säkerhetsåtgärder i form av skrotning och bergförstärkning kan risken för bergutfall inte helt uteslutas. Med hänsyn till den långsiktiga säkerheten kommer man att vara mer återhållsam med förstärkningsåtgärder i deponeringsorterna. Om ett utfallande bergblock skulle träffa strålskärmsstuben skulle vissa ytliga skador på denna kunna uppstå. Kapseln bedöms dock inte påverkas. Efter en bedömning av stötens storlek, kan man vid behov låta kapseln gå tillbaka till inkapslingsanläggningen för kontroll.

**Tabell 5-1. Zonindelning med avseende på strålskydd i svenska kärntekniska anläggningar.**

Zon	Dosratsnivå (mSv/tim)	Tillträddbarhet	Färgmarkering
0	- <sup>1</sup>	Okontrollerat område, obegränsat tillträde	Vit
1	<0,01 <sup>2</sup>	Kontrollerat område, obegränsat tillträde (i praktiken 40 tim/vecka)	Blå
2	0,01 <sup>2</sup> –1,0	Kontrollerat område, tillträde 1–5 tim/vecka	Gul
3	>1,0	Kontrollerat område, begränsat tillträde under övervakning	Röd

<sup>1</sup> Upp till 0,0075 mSv/tim kan tillåtas om vistelsetiden är högst 30 % av arbetstiden i medeltal per månad.

<sup>2</sup> Gränsen 0,01 mSv/tim tillämpas av OKG. Övriga anläggningar använder 0,025 mSv/tim.

Kriticitet kan endast förekomma i kapslar med bränsle som har en högre resthalt av uran-235 än normalt. Analyser visar att bränsle som använts normalt i kärnreaktorerna har en utbränning som innebär att det med marginal kan placeras i kapseln ur kriticitetssäkerhetssynpunkt. PWR-bränsle med hög anrikning och låg utbränning uppfyller dock inte kravet på kriticitetssäkerhet. Vid tillräckligt låg utbränning gäller detta även om endast ett bränsleelement placeras i kapseln. Så låg utbränning kan endast förekomma i samband med stora bränsleskador eller oplanerade förtida slutliga avställningar av kärnkraftverk. Risken för kriticitet i sådana kapslar kommer att utredas.

### 5.3 Djupa borrhål

Vid analysen av den kärntekniska säkerheten under driften av en anläggning för deponering av använt kärnbränsle i djupa borrhål är följande frågeställningar av särskild vikt:

- Säkerhet mot direktstrålning.
- Kriticitetssäkerhet.
- Brandsäkerhet.
- Säkerhet mot aktivitetsläckage vid hantering.
- Säkerhet mot skador på kapseln vid deponering.
- Åtgärder vid eventuella skador.

Kraven på strålskärmning vid hanteringen är likartade som i ett KBS-3-förvar trots att mängden bränsle per kapsel är mindre. Kapslarna antas ha avsynats och kontrollerats bland annat för att säkerställa att de inte har någon radioaktiv ytbeläggning på utsidan när de anländer till deponeringshålet. Utrustningen för att deponera kapseln i hålet måste komma åt kapseln uppifrån med någon form av hissmaskineri. Detta är en faktor som man måste ta hänsyn till vid utformningen av strålskärmningsåtgärder och deponeringsrutiner.

I en tidigare studie /Juhlin och Sandstedt 1989/ har det föreslagits att flera kapslar med mellanliggande bentonitblock skulle sättas samman till deponeringspaket. Hopsättningen av sådana deponeringspaket är i så fall ytterligare ett arbetsmoment som kan ge upphov till en strålningsbelastning och som man därför behöver ta extra hänsyn till vid utformningen av en anläggning.

Kriticitetsrisken har inte utretts för de kapslar som antagits komma till användning vid deponering i djupa borrhål. Frågeställningarna är desamma som för kapslarna i ett KBS-3-förvar med de skillnaderna att kapselmaterialet är annorlunda och mängden använt bränsle per kapsel är mindre.

Risker för brand och aktivitetsfrigörelse på grund av hanteringsmissöden i ovanmarksdelen kan hanteras på samma sätt som i ett KBS-3-förvar.

I samband med att kapseln sänks ner i borrhålet kan flera typer av missöden ge upphov till skador på kapseln så att radioaktiva ämnen frigörs. Nedan beskrivs vad som skulle kunna bli följden om en kapsel tappas under nedsänkning respektive om den fastnar.

Om kapseln tappas under nedsänkningen blir fallhöjden mycket hög. Fallet dämpas visserligen i någon mån av den vätska som står i borrhålet. Gränssättande för den hastighet som kapseln får blir en kombination av densitetsskillnaden mellan kapsel och borrhålvätska samt strömningsmotståndet när kapseln under sin nedfärd tränger undan borrhålvätskan. Om kapseln faller med tillräckligt hög hastighet skulle den kunna skadas i sådan omfattning att radioaktiva ämnen frigörs. En skadad kapsel kan leda till kontaminering av borrhålvätskan och om deponeringen fortsätter i samma hål, kan även deponeringsutrustningen bli kontaminerad. Hittills har inga beräkningar av den maximala fallhastigheten gjorts.

Om en kapsel skulle fastna i samband med nedsänkningen i hålet kan den skadas. Skadan kan uppstå antingen i samband med att den fastnar och utsätts för tyngden av borrhåsträngen eller i samband med att man försöker få loss den. I båda fallen kan skadan leda till att deponeringsverktyget och borrhålsvätskan kontamineras. Om man inte får loss kapseln kan man behöva försluta och överge deponeringshålet, som då kommer att innehålla en skadad kapsel som kan sitta fast på en nivå med strömmande grundvatten. Om så skulle ske lär det vara svårt att på ett effektivt sätt omge kapseln med buffertmaterial som dämpar eller eliminerar aktivitetsläckaget. Detta är ett scenario som måste hanteras i analysen av den långsiktiga säkerheten.

Som en följd av risken för hanteringsmissöden, kommer det att behövas en beredskap för att ta hand om och rengöra kontaminerade redskap. Det kan även uppstå situationer där stora mängder kontaminerad borrhålsvätska behöver tas omhand. Det finns idag teknik för omhändertagande av radioaktivt processvatten vid till exempel kärnkraftverk. Det är dock tveksamt om denna erfarenhet kan appliceras direkt på borrhålsvätska med sitt innehåll av lera.

Det måste betraktas som mycket svårt att med mätningar eller på andra sätt avgöra om det finns skadade kapslar i deponeringshålet. En otäthet kan initialt vara mycket liten och därför inte mätbar i den strålningsbakgrund som är normal i berget eller som kommer från andra deponerade kapslar.

## 5.4 Sammanfattning

	KBS-3	Djupa borrhål
Kärnteknisk säkerhet	Slutförvaret är <i>en</i> enstaka <i>kärnteknisk</i> anläggning.	<i>Varje</i> borrhål utgör <i>en</i> kärnteknisk anläggning (cirka 60 borrhål i referensscenariet).
Störningar och missöden	Leder inte till radiologiska konsekvenser. Missöden är reparerbara.	Kan medföra radiologiska konsekvenser. Missöden är inte med säkerhet reparerbara.
Kontrollerbarhet	Hantering från 500 m djup i hål mindre än 10 m djupa, ger observerbar, kontrollerbar och verifierbar deponering.	Hantering från ytan i flera kilometer djupa hål, utan möjlighet att kontrollera och verifiera att deponeringen skett som avsett.



## 6 Långsiktig säkerhet

### 6.1 Inledning

I detta kapitel jämförs hur kraven på långsiktig säkerhet vid slutförvaring av använt kärnbränsle uppfylls enligt KBS-3-metoden och enligt konceptet djupa borrhål. Framställningen om KBS-3-metoden bygger på den analys av den långsiktiga säkerheten som SKB har redovisat i SR-Can /SKB 2006c/. SR-Can gav en första värdering av den långsiktiga säkerheten för ett slutförvar beläget i Forsmark respektive Laxemar och genomfördes med preliminära data från platsundersökningarna. Den slutliga analysen av den långsiktiga säkerheten SR-Site som ingår i ansökningarna, baseras på fullständiga data från platsundersökningen i Forsmark. Någon ingående analys av den långsiktiga säkerheten existerar inte och är inte planerad, när det gäller konceptet djupa borrhål. Ur de rapporter som publicerats under årens lopp kring detta koncept (se avsnitt 6.3.1) är det emellertid möjligt att på en övergripande nivå få en bild av den långsiktiga säkerheten.

I SR-Can beskrivs och analyseras de risker som kan uppkomma vid en tänkbar framtida utveckling av förvarssystemet, en så kallad referensutveckling. Denna har i sin tur lagts till grund för val av ett antal scenarier, vilka också har analyserats utifrån risksynpunkt. Dessa analyser sammanfattas i avsnitt 6.2. Avsnitt 6.3 innehåller en ansats till en så långt möjligt motsvarande framställning för konceptet djupa borrhål.

Huvudsyftet med en analys av den långsiktiga säkerheten för ett slutförvar är, att undersöka om slutförvaret kan betraktas som radiologiskt säkert i ett långt tidsperspektiv. Detta görs genom att man först analyserar om det finns några tänkbara sätt på vilka utsläpp av radionuklider kan ske från slutförvaret och sedan beräknar de radiologiska konsekvenserna av dessa utsläpp. Därefter jämförs konsekvenserna med det säkerhetskriterium som har satts av säkerhetsmyndigheten.

Utformningen av och innehållet i en säkerhetsanalys samt de kriterier som ska användas för att bedöma slutförvarets säkerhet anges i föreskrifter från Strålsäkerhetsmyndigheten. De specifika reglerna för den långsiktiga säkerheten för slutförvar för använt kärnbränsle återfinns i *Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall*, SSMFS 2008:37, samt *Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om säkerhet vid slutförvaring av kärnämne och kärnavfall*, SSMFS 2008:21. I den första av dessa föreskrifter anges bland annat att den årliga risken för skadeverkningar inte får överstiga  $10^{-6}$  för en representativ individ samt anvisningar om vilken detaljeringsgrad som erfordras i en säkerhetsanalys för olika tidsintervall. I SSMFS 2008: 21 ges anvisningar om hur olika scenarier ska hanteras liksom hur modellens tillämpbarhet ska demonstreras och osäkerheter hanteras i säkerhetsanalyser.

Systemets framtida tillstånd beror på:

- Initialtillståndet, som avser de sista kontrollerbara och dokumenterbara egenskaperna i produktionslinjen för respektive barriär/anläggningsdel.
- Interna processer som under tidens lopp äger rum i systemet.
- Yttre påverkan på systemet.

Med interna processer avses termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska processer som äger rum i systemet, till exempel sönderfallet av radioaktivt material som ger en uppvärmning av bränslet, de tekniska barriärerna och det omgivande berget. Andra exempel på interna processer är grundvattenrörelser och kemiska processer som påverkar de tekniska barriärerna och grundvattnets sammansättning. Den yttre påverkan omfattar sådana processer som klimatförändringar, landhöjning och mänskliga ingrepp.

Varken initialtillståndet, de interna processerna eller den yttre påverkan kan givetvis beskrivas exakt. Beskrivningarna kommer därför att vara behäftade med vissa osäkerheter. Hanteringen av osäkerheter är därför viktig i en säkerhetsanalys.

## 6.2 KBS-3

### 6.2.1 Säkerhetsprinciper och barriärfunktioner

Säkerhetsfilosofin bakom KBS-3-metoden bygger i sina huvuddrag på följande principer:

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

Dessa principer har lett fram till en definition av så kallade *säkerhetsfunktioner* för individuella barriärer med tillhörande säkerhetsfunktionsindikatorer och kriterier för dessa. Säkerhetsfunktionerna, indikatorerna och kriterierna sammanfattas i *Figur 6-1 /SKB 2007b/*.

KBS-3-metoden har vid flera tillfällen genomgått ingående säkerhetsanalyser varav SR-Can är den senast publicerade /SKB 2006c, 2007b/. Arbete pågår med säkerhetsanalysen SR-Site. I SR-Can beskrivs och analyseras de risker som kan uppkomma dels för en referensutveckling, dels för ett antal scenarier. Dessa analyser sammanfattas i efterföljande avsnitt.

### 6.2.2 Referensutveckling och risker

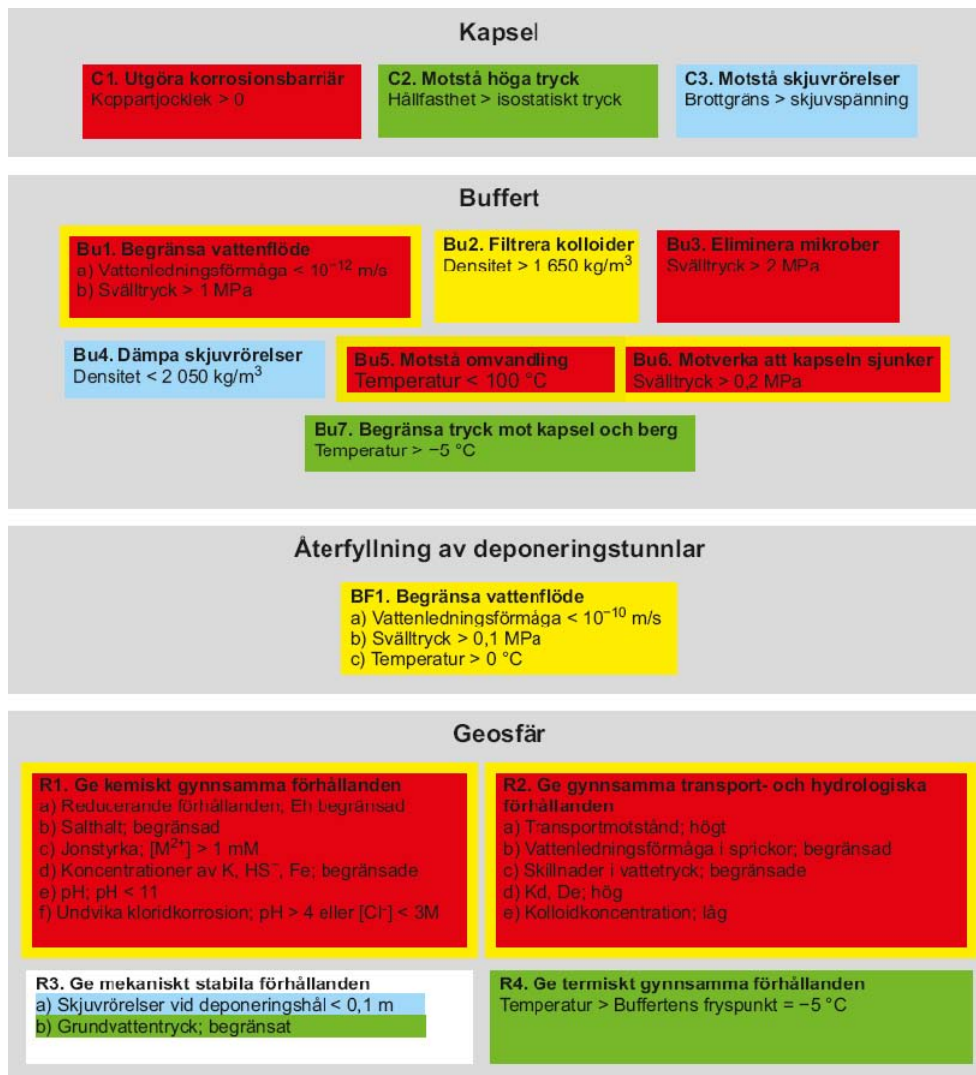
I SR-Can beskrevs två varianter av en referensutveckling under en miljon år. Den ena var en basvariant där de yttre förhållandena under den första glaciationscykeln på 120 000 år, antas likna dem som rådde under den senaste glaciationscykeln, Weichselistiden. Den andra betecknades som en ”växthusvariant”, där det framtida klimatet, och följaktligen de yttre förhållandena, till en början antas starkt påverkade av mänskligt orsakade utsläpp av växthusgaser.

Referensutvecklingen utgör ett rimligt exempel på en framtida utveckling för slutförvaret och de konsekvenser denna utveckling har för förvarets säkerhet /SKB 2006c/. Ett viktigt tidsperspektiv i denna utveckling är en fullständig istidscykel, vilken är omkring 100 000 år. I referensutvecklingen antas den senaste istidscykeln, Weichselistiden, och den nuvarande värmeperioden, Holocen, upprepas. Av analysen av referensutvecklingen framgår att slutförvaret kan förväntas utsättas för de största påfrestningarna just i samband med framtida nedisningar. Som en variant av referensutvecklingen har även effekterna av en ökad växthuseffekt studerats.

Analysen av referensutvecklingen genomfördes för fyra tidsperioder:

- Förvarets byggnads- och driftsfas, cirka 70 år.
- Den första tempererade perioden efter förslutning, några tusen år.
- Den första glaciationscykeln, 120 000 år.
- Tiden efter den första glaciationscykeln, fram till en miljon år.

Inom varje period analyserades utvecklingen till följd av de processer som verkar inom slutförvaret och den yttre påverkan som det utsätts för. Generellt visade analysen att slutförvaret kan förväntas utsättas för de största påfrestningarna i samband med nedisningar.



**Figur 6-1.** Barriärernas säkerhetsfunktioner (fetstil), säkerhetsfunktionsindikatorer och kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer i KBS-3. Färgkodningen visar hur funktionerna bidrar till kapselns säkerhetsfunktioner som korrosionsbarriär (röd), hållfasthet mot yttre tryck (grön), säkerhet mot skjuvrörelser (blå) respektive till fördröjning av radionuklider (gul).

Analysen av den första perioden, när anläggningen är under uppförande eller i drift, inriktas på effekter av förhållanden som är av vikt för den långsiktiga säkerheten och som orsakas av störningar från mekaniska, hydrologiska och kemiska förhållanden på grund av byggande och drift. Följande två fenomen antogs få betydelse för den långsiktiga säkerheten:

- Bildning av en sprängskadad zon kring deponeringshål och framförallt kring deponeringsorter. En sådan zon skulle kunna utgöra en transportväg för grundvatten, och eventuellt för radionuklider, om den är omfattande och sammanhängande. Resultaten av analysen visar att zonen uppkommer, men inte är sammanhängande samt att även en sammanhängande zon skulle ha en mycket begränsad betydelse för säkerheten.
- Kanalbildning i bufferten omedelbart efter deponering på grund av höga gradienter av grundvattentrycket i det öppna förvaret. Fenomenet har observerats så väl i laboratorium som i fältförsök. Det upphör när gradienterna minskar i samband med att slutförvaret fylls med grundvatten. Analyserna i SR-Can visar att fenomenet kan leda till förlust av något hundratal kilogram av de totalt 20 ton bentonit som finns i ett deponeringshål samt att denna förlust inte ensam har någon påverkan på säkerheten, men att den måste utvärderas tillsammans med buffertförluster av andra orsaker under de efterföljande epokerna.

Den första perioden med tempererade klimatförhållanden varar enligt referensutvecklingen i flera tusen år. Under denna period sker dels en återmättnad av förvaret och förvarsberget med inströmmande grundvatten, dels en uppvärmning av de olika komponenterna i slutförvaret (kapsel, buffert och förvarsberg) på grund av resteffekten i det deponerade kärnbränslet. Återmättnaden av förvarsberget kan förväntas ske inom en period av upp till 50 år och för bufferten något hundratal år. Under slutet av återmättnadsperioden kan kapseln utsättas för ett ojämnt svälltryck i bufferten. Kapseln är dock dimensionerad för att med god marginal motstå detta. Bufferten är den komponent i slutförvaret som har den striktaste begränsningen på temperaturen. Denna bör ligga under 100 °C för att man inte ska riskera omvandling av bentoniten till andra mineral, varigenom vissa av buffertens positiva egenskaper går förlorade. Beräkningar visar att den maximala bufferttemperaturen uppnås efter omkring tio år och blir cirka 80 °C.

De mekaniska analyserna för den första tempererade perioden visar på, att det inte kan uteslutas att uppvärmningen av berget kan leda till spänningar och eventuellt sprickbildningar intill deponeringshålen. Då detta kan påverka de förhållanden som styr kapselkorrosion och radionuklidtransport genom bufferten, tas denna effekt med i beräkningar för de efterföljande tidsperioderna och i scenarioanalysen.

Konsekvenserna av förändringar i yttre förhållanden under den första glaciala cykeln i referensutvecklingen för slutförvarets säkerhet har analyserats ingående, varvid särskild uppmärksamhet har ägnats åt kapselns isolerande förmåga och buffertens egenskaper. De huvudsakliga resultaten av analysen av de 120 000 åren som den första glaciala cykeln antas pågå kan sammanfattas som följer:

- Buffertens temperatur förblir över fryspunkten under hela den glaciala cykeln.
- Bufferten omvandlas inte i nämnvärd omfattning till material med mindre gynnsamma egenskaper.
- Vatten med låg salthalt från smältning av inlandsisen kan förekomma i slutförvaret under perioder med glaciala förhållanden. Detta kan leda till förlust av buffertmaterial i några deponeringshåll så att, i extrema fall, flöde av grundvatten genom deponeringshålet kan förekomma.
- Så länge bufferten är intakt och hindrar genomströmning av grundvatten i deponeringshålet, är effekterna av korrosion på kapseln försumbara. Om så mycket buffert förloras att genomströmning genom deponeringshålet uppstår, ökar korrosionen på kapseln. Inga kapslar förväntas förlora sin täthet under den första glacialcykeln, det vill säga under de första 120 000 åren.
- Förhöjda grundvattentryck på grund av att markytan täcks av en inlandsis, leder inte till att kapslarna skadas.
- Jordskalv i närheten av slutförvaret med en magnitud av 6 eller mer bedöms vara mycket osannolika. Om en sådan jordbävning skulle inträffa bedöms i värsta fall någon kapsel skadas. Den beräknade risken av detta ligger långt under den av myndigheterna satta riskgränsen.

Under perioden efter den första glaciationscykeln och upp till en miljon år efter deponering, antas i SR-Cans huvudscenariot att sju ytterligare glaciationscykler av samma typ som den första inträffar. Huvudslutsatserna för denna epok kan sammanfattas:

- Omfattningen av buffertförlust på grund av erosion förväntas öka med tiden. Detta leder till ökad kapselkorrosion och kan medföra genombrott på ett fåtal kapslar under tiden fram till en miljon år. Den beräknade risken av detta ligger långt under myndighetens riskgräns och uppskattas även i miljonårsperspektivet ligga på motsvarande låga nivå.
- Sannolikheten för att ett stort jordskalv ska inträffa i slutförvarets närhet ökar med tiden. Den beräknade risken av detta ligger långt under myndighetens riskgräns och uppskattas även i miljonårsperspektivet ligga på motsvarande låga nivå.

Analyserna pekar inte på att några andra säkerhetsfunktioner hotas i referensutvecklingen. Växthusvarianten av referensscenariot bedöms vara gynnsammare för slutförvarets säkerhet.

### 6.2.3 Scenarioanalys och risker

Scenarioanalysen utgår från barriärernas säkerhetsfunktioner, *Figur 6-1*, och syftar till att för varje funktion studera om den på något sätt kan slås ut. Detta görs genom att man inledningsvis ställer ett antal kritiska frågor kring slutförvarets säkerhet. Var och en av dessa frågor har sedan utretts som separata scenarier. Målet är att svara på frågan om det finns någon rimlig möjlighet att ett visst scenario kan inträffa. Frågorna var följande:

- Kan bufferten frysa?
- Kan buffertleran omvandlas till material med ogynnsamma egenskaper?
- Kan bufferten försvinna?
- Kan kapseln korrodera sönder?
- Kan kapseln skadas av trycket från den svällande bentonitleran eller av grundvattentrycket på försvarsdjup vid en nedisning?
- Kan kapseln skadas av jordskalv?
- Vad blir effekterna av intrång eller andra framtida mänskliga handlingar?

Effekterna av mänskligt intrång redovisas här tillsammans med scenarioanalysen. I SR-Can redovisas denna fråga separat. I scenarioanalysen granskas sedan alla sätt på vilka respektive säkerhetsfunktion kan brytas. Målet för analysen är att utreda om det finns någon rimlig möjlighet att ett scenario som bryter en säkerhetsfunktion kan inträffa. Om så visar sig vara fallet tas scenariot med i risksummeringen för slutförvaret. I annat fall betraktas scenariot i enlighet med de allmänna råden till Strålsäkerhetsmyndighetens, SSM:s, föreskrifter om säkerhet vid slutförvaring av kärnämne och kärnavfall (SSMFS 2008:21) som ett så kallat restsenario, vars konsekvenser analyseras som en illustration av betydelsen att just den säkerhetsfunktionen upprätthålls.

En viktig fråga är huruvida uppsättningen av analyserade scenarier är tillräckligt omfattande för att ge en allsidig belysning av säkerhet och risker. I SR-Can baserar sig valet av scenarier både på de processer och på de kopplingar mellan processer som analyseras i referensutvecklingen och på en genomgång av om alla osäkerheter verkligen tagits med på ett adekvat sätt när scenarierna studerats med barriärernas säkerhetsfunktioner i fokus. Nedan görs en mycket kortfattad genomgång av de svar på de kritiska frågorna ovan som erhållits i scenarieanalysen i SR-Can.

#### **Kan bufferten frysa?**

De faktorer som styr svaret på denna fråga är främst *i)* temperaturutvecklingen vid markytan, *ii)* om ytan täcks av snö, is, vegetation eller hav, *iii)* bergets värmeledningsförmåga, *iv)* försvarsdjupet, *v)* värmeflödet från jordens inre, *vi)* värmeavgivningen från bränslet och *vii)* buffertens frystemperatur ( $-5\text{ °C}$ ). Slutsatsen av analyserna är att man under extremt torra förhållanden under en istid, utan ett isolerande täcke av snö, inlandsis eller hav, får ett maximalt djup för  $-5\text{ °C}$  isotermin på 200 meter för den föreslagna förläggningssplatsen i Forsmark. Denna beräkning tillsammans med andra känslighetsanalyser visar att bufferten på försvarsdjup klarar sig från frysning, även under antagande av mycket extrema förhållanden. I ett extremfall, när delar av bufferten har gått förlorad så att hålrum bildas i deponeringshålet, ökar risken för att kapselns närmaste omgivning ska frysa. Analysen visar dock att detta inte leder till att kapseln skadas.

#### **Kan buffertleran omvandlas till material med ogynnsamma egenskaper?**

Det är känt att det mineral som buffertleran är uppbyggd av, kan omvandlas till mineral med mindre gynnsamma egenskaper vid höga temperaturer. Av denna anledning har man satt en begränsning på lerans temperatur på högst  $100\text{ °C}$ . Eftersom beräkningar har visat att dessa förändringar uppträder först vid  $130\text{ °C}$ , ger denna begränsning en god marginal. Möjliga orsaker till att temperaturen i leran skulle överstiga den satta begränsningen, till exempel för hög resteffekt i kapseln eller att man missbedömt värmeledningsförmågan hos berget eller bufferten, har analyserats i SR-Can. Slutsatsen är att de kvalitetssäkringsrutiner som kommer att omgärda deponeringen, gör dessa orsaker mycket osannolika. Det är även känt att buffertleran kan påverkas av pH-värden högre än 11. Det finns inga naturliga processer som ger så höga pH-värden. Eftersom lakvatten från cement kan ha pH-värden

i denna storleksordning, används i slutförvaret så kallad låg-pH-cement, särskilt i de delar av slutförvaret som ligger nära deponeringshålen. Påverkan på bufferten från höga pH-värden bedöms därför vara osannolik. Scenariot att bufferten skulle omvandlas och därmed förlora sina gynnsamma egenskaper, har vid en sammantagen bedömning betraktats som ett restscenario.

### **Kan bufferten försvinna?**

I scenarioanalysen identifieras tre möjliga orsaker till förlust av buffertmaterial: *i)* förlust uppåt till återfyllningsmaterialet i deponeringsorten genom svällning, *ii)* kanalbildning genom att vatten strömmar in i deponeringshålet och för bort lermaterial innan detta har hunnit vattenmättas och svälla samt *iii)* förlust genom att bufferten löses upp i grundvatten med låg salthalt, främst i samband med glaciationer. Det är främst den sistnämnda mekanismen som eventuellt skulle kunna tänkas ge förluster i sådan omfattning att buffertens funktioner skulle kunna hotas. Denna fråga har därför hög prioritet i SKB:s forskningsprogram. Omfattningen av buffertförlusten under glaciala förhållanden är osäker. I SR-Can har man därför analyserat flera fall som spänner över området från ingen buffertförlust alls, till att bufferten antas gå förlorad redan vid deponeringen i sådan omfattning att dess grundläggande funktioner går förlorade. På detta sätt ramas de möjliga konsekvenserna av osäkerheterna kring buffertförluster in. Eftersom den främsta effekten av en buffertförlust är att kapseln exponeras för grundvattenflödet med sitt innehåll av ämnen som kan korrodera kopparkapseln, förs dessa fall vidare till scenariot som behandlar risken för kopparkorrosion.

### **Kan kapseln korrodera sönder?**

Kapseln i ett KBS-3-förvar består ytterst av ett tätt skal av fem centimeter tjock koppar. Koppar är en ädel metall med stor förmåga att motstå kemiska angrepp. Omfattande studier har visat att av de ämnen som förekommer i naturliga grundvatten är det endast syre och sulfid som skulle kunna angripa koppar. Naturligt grundvatten är fritt från löst syre på förvarsdjup. Det syre, som förs ner med luften i samband med att förvaret byggs och under drifttiden förbrukas snabbt av bakterier och mineraler i berget när förvaret förslutits. Under perioder av nedisning skulle syresatt vatten teoretiskt kunna tränga ner till förvarsdjup genom större sprickor. Det är dock osannolikt att ens en liten del av detta syre når kapslarna, eftersom dessa kommer att placeras så att deponeringshålen inte korsas av större sprickor. I analysen har kopparkorrosion från syre i slutförvaret bedömts vara mycket liten. Naturligt grundvatten innehåller begränsade mängder sulfid. Mikrober kan genom reduktion av sulfatjoner bidra till bildningen av sulfid. Dessa mikrober behöver en energikälla för sin fortlevnad. En möjlig sådan är grundvattnets innehåll av metan.

Kapselkorrosionsscenarioet har analyserats utgående från tre olika nivåer på koncentrationen av korrosiva ämnen (metan och sulfid) i grundvattnet, tre alternativa grundvattenströmningsmodeller och tre olika antaganden om bufferterrosion. Sammantaget ger detta  $3 \times 3 \times 3 = 27$  olika kombinationer att utvärdera och som täcker in allt från "realistiska" till mycket pessimistiska betingelser. Med en "realistisk" grundvattensammansättning fås inga kapselskador under analysperioden på en miljon år. Vidare kommer inga kapslar att skadas om bufferten är intakt så att inget grundvattenflöde förekommer genom deponeringshålet. I själva verket uppträder kapselskador inom en miljon år endast i sex av de 27 kombinationerna och inom 100 000 år i två av kombinationerna. I de fall där kapselskador uppträder, ligger den beräknade risken nära eller klart under den av myndigheten satta riskgränsen. Kapselkorrosionsscenarioet har därför fått ingå i risksummeringen i SR-Can.

Efter att SR-Can publicerats har korrosion av koppar fått stor uppmärksamhet, bland annat vid det seminarium som anordnades av Kärnavfallsrådet i mars 2009. Forskare från KTH hävdar att koppar kan korrodera under vätagasutveckling genom direkt reaktion med vatten utan att det innehåller löst syre eller sulfid. Såväl SKB som av SSM anlidade experter ställer sig tveksamma till forskarnas resultat. SKB kan dock konstatera att även om den av forskarna framförda processen skulle existera, så är det ändå korrosion orsakad av sulfider som kommer att dominera korrosionsförloppet. SKB utreder frågan både genom experiment (elektrokemiska studier) och teoretiska beräkningar samt genom mätningar av kopparkorrosion i slutförvarsmiljö, bl.a. i Äspölaboratoriet. I vilken utsträckning väte kan påverka kopparmaterialet under slutförvarsförhållanden kommer också att studeras vidare. SKB kommer även att ta upp denna korrosionsmekanism till diskussion i den kommande säkerhetsanalysen SR-Site.

### **Kan kapseln skadas av trycket från den svällande bentonitleran och av grundvattentrycket på förvarsdjup vid nedisning?**

I slutförvaret utsätts kapseln för ett yttre tryck från den svällande bufferten och från grundvattnet. Kapseln är dimensionerad för att tåla ett stort yttre tryck. Vid tillverkningen av kapseln sätts den stålkasset som innehåller kanaler för bränsleelementen inuti gjutformen och blir en integrerad del av insatsen. Att denna kasset sätts centrerat i gjutformen är en hållfasthetspåverkande kvalitetsparameter. En kapsel som är tillverkad enligt givna specifikationer har beräknats kunna motstå ett yttre likformigt tryck av 130 megapascal. Vid provtryckning av två kapslar kollapsade dessa vid 130 respektive 139 megapascal. Skillnaden tillskrevs att stålkassetten inte var helt centrerad i den första kapseln. Vid beräkningar har SKB:s finska motsvarighet, Posiva Oy, kommit fram till att kollapstrycket för en kapsel med dåligt centrerad kasset är 93 megapascal. Sammantaget har beräkningarna visat att kollapstrycket är 90–100 megapascal för en kapsel som inte är perfekt tillverkad enligt specifikationerna. När kapselns hållfasthet mot yttre tryck är bestämd, återstår att uppskatta hur högt tryck som kapseln kan utsättas för.

Buffertens svälltryck är beroende av den kompakterade bentonitens densitet (täthet) som ska vara 2 000±50 kilogram per kubikmeter. Vid 2 000 kilogram per kubikmeter är svälltrycket sju megapascal och vid 2 050 kilogram är det 13 megapascal. Utredningar inom SR-Can har lett till slutsatsen att svälltrycket aldrig kommer att överstiga 13 megapascal.

Grundvattentrycket på förvarsdjup (cirka 500 meter) är cirka fem megapascal. Under framtida nedisningar kommer detta tryck att kunna öka med tyngden av istäcket ovanpå marken. Vid analys av den maximala istjocklek som förekommit under de senaste två miljoner åren, under den så kallade Saale-istiden, beräknas istäcket ha varit maximalt 3 100 meter vid den valda förläggningsplatsen i Forsmark. Läggs tyngden av detta istäcke ihop med trycket från grundvattnet på det aktuella förvarsdjupet på de båda platserna fås ett maximalt grundvattentryck på 32 megapascal i Forsmark. Man kan således notera att summan av maximalt svälltryck från bufferten och maximalt grundvattentryck med god marginal ligger under det beräknade kollapstrycket för en icke perfekt tillverkad kapsel.

### **Kan kapseln skadas av jordskalv?**

Kapseln kan, förutom av yttre tryck (se ovan) skadas mekaniskt av rörelser i berget, främst skjuvningsrörelser vid deponeringshålet (förskjutningar längs sprickor som skär deponeringshålet). Inom SR-Can har omfattande modellstudier genomförts för att utreda hur stora sådana skjuvningsrörelser som kapseln kan tåla utan att dess täthet går förlorad. I en efterföljande analys /SKB 2009/ har konstruktionsförutsättningarna för kapseln utformats så att kapselns korrosionsskyddande skal ska förbli intakt vid en skjuvrörelse på fem centimeter med en skjuvningshastighet på 21 m/s samt att segjärnsinsatsen ska behålla sin förmåga att motstå det isostatiska trycket efter en sådan skjuvrörelse. Detta krav ska gälla ner till en temperatur av 0 °C och med en buffert bestående av kalciumbentonit med en densitet på 2 050 kg/m<sup>3</sup>.

Jordskalv är rörelser i större sprickor eller sprickzoner i berggrunden. Stora skalv är generellt mycket sällsynta i Sverige, eftersom vi befinner oss långt från tektoniskt aktiva zoner. I samband med att en inlandsis kommer och drar sig tillbaka, kan dock skalvfrekvensen och magnituden på skalv öka eftersom de spänningar som byggs upp frigörs. I riktigt långa tidsperspektiv kan man inte utesluta att ett stort jordskalv inträffar i slutförvarets närhet. Man behöver därför bygga in ett mått av jordbävningssäkerhet i förvarsutformningen. Detta sker genom att kapseln görs mekaniskt stark och genom att placera kapslarna så att man minskar risken för skador från eventuella större skalv. Det senare innebär att man inför ett så kallat respektavstånd till större sprickzoner. Detta innebär dels att avståndet mellan deponerade kapslar och sprickzoner som bedöms vara tillräckligt stora för att hysa jordbävningar av magnituden 6 eller större inte får vara mindre än respektavståndet, dels att man undviker kapselpositioner som genomkorsas av så stora sprickor att sekundära bergrörelser i samband med skalv kan uppgå till fem centimeter eller mer. Den sammantagna bedömningen i SR-Can är att kapselskador till följd av jordskalv är mycket osannolika, dels för att stora skalv är osannolika, dels för att både kapseln och slutförvaret har utformats för att begränsa skador på grund av bergrörelser. När sannolikheter och konsekvenser av sådana bergrörelser vägs samman, hamnar den beräknade risken under den av myndigheterna satta riskgränsen.

### **Vad blir effekterna av intrång eller andra framtida mänskliga handlingar?**

Slutförvaret kan påverkas av olika typer av framtida mänskliga handlingar. I en säkerhetsanalys behöver därför scenarier för framtida mänskliga handlingar, som kan påverka förvarets långsiktiga funktion och säkerhet behandlas. Ett grundläggande problem för sådana analyser är att framtiden för människa och samhälle inte kan förutsägas. Det är uppenbart att slutförvarets existens kan falla i glömska under de långa tidsperspektiv som säkerhetsanalysen omfattar, men det är också möjligt att anläggningens existens förblir känd under lång tid.

Intrång i förvaret kan vara avsiktliga eller oavsiktliga. Av SSM:s föreskrifter om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall (SSMFS 2008:37) med tillhörande allmänna råd, framgår att analysen av mänsklig påverkan på slutförvaret ska omfatta en analys av oavsiktlig påverkan på förvarets skyddsfunktion. Dessa principer ligger i linje med internationella rekommendationer /OECD NEA 1995, ICRP 2000/. I samband med att Statens Strålskyddsinstitut (numera del av SSM) gav ut nämnda föreskrifter (då SSIFS 1998:1) angavs en viktig utgångspunkt vara, att intrång innebär att samhället har ansvar för sina egna medvetna handlingar. Det är därför inte nödvändigt, i samband med ansökningarna, att belysa frågor om av samhället sanktionerat avsiktligt intrång i ett avfallsförvar.

Det ligger i KBS-3-metodens natur att slutförvaret ska vara så konstruerat att det inte kräver ingrepp i framtiden. Så länge slutförvarets existens är känd får man räkna med att det kommer att finnas en diskussion om huruvida förvaret ska lämnas orört eller inte.

För att minska sannolikheten för oavsiktliga intrång i förvaret vidtas flera åtgärder:

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

Oavsiktliga intrång kan dock inte uteslutas och utgör en del av säkerhetsanalysen. I enlighet med SSM:s allmänna råd behandlas framtida mänskliga handlingars inverkan på slutförvaret separat, men tas inte med i huvudscenariot eller i risksummeringen. I SR-Can har en systematik med analys i fyra steg använts:

- I. Teknisk analys – identifiering av mänskliga handlingar som kan påverka säkerhetsfunktionerna och förvaret samt beskrivning och motivation av handlingarna i tekniska termer.
- II. Analys av samhälleliga faktorer – identifiering av ramförhållanden som beskriver samhälleliga sammanhang för framtida mänskliga handlingar som kan påverka den radiologiska säkerheten hos förvaret.
- III. Val av representativa fall – resultaten av tekniska och samhälleliga analyser kombineras och ett eller flera illustrativa fall av framtida mänskliga handlingar väljs.
- IV. Scenariobeskrivning och konsekvensanalys av de valda fallen.

Analysen har lett till att följande tre fall valts för scenariobeskrivning och konsekvensanalys:

- Kapselskada genom borrhning. Om en kapsel penetreras genom borrhning, om säkerhetsfunktionerna går förlorade och om borrhålet därefter används som en dricksvattenbrunn, kommer de människor som använder vattnet att få en högre stråldos än den av myndigheten satta riskgränsen, men inte högre än den dos som orsakas av bakgrundsstrålningen i Sverige.
- Berganläggning i närheten av förvaret. Detta fall gäller en berganläggning på cirka 50 meters djup i närheten av förvaret. En sådan anläggning kommer inte att påverka förvarets säkerhet.
- Gruva i närheten av Forsmark. Analysen visar att om framtida generationer väljer att exploatera de malmresurser som identifierats sydväst om undersökningsområdet i Forsmark, kan de göra detta utan att exponera sig för radioaktivt material från slutförvaret.



## 6.2.4 Resultat från analys av den långsiktiga säkerheten

SR-Can visar att ett slutförvar placerat i Forsmark klarar SSM:s riskkriterium. SR-Can pekar även ut ett antal frågor där ytterligare utredningar behövs. Sådana frågor är till exempel risken för värmeinducerade sprickor i berget i deponeringshålets omedelbara närhet, risken för att kolloidala partiklar från buffertmassan ska försvinna ut i sprickor som korsar ett deponeringshål liksom att en förändrad vattenkemi i samband med framtida nedisningar kan leda till förlust av buffertmassa.

SR-Can visade även att barriärsystemet i KBS-3 är motståndskraftigt mot många framtida belastningar. Till exempel bedömdes en framtida nedisning inte kunna leda till en frysning av bufferten eller kapselbrott på grund av isostatisk last. Vidare bedömdes riskbidraget från jordskalv vara litet.

## 6.3 Djupa borrhål

### 6.3.1 Säkerhetsprinciper och barriärfunktioner

Säkerheten för deponering i djupa borrhål har aldrig analyserats på det sätt som gjorts för KBS-3. En mycket preliminär analys av ett borrhål med diametern 0,445 meter i vilket 400 bränsleelement från tryckvattenreaktorer har deponerats redovisas av /Brady et al. 2009/. Denna analys omfattar endast transport av radionuklider uppåt i borrhålet eller i den störda zonen runt borrhålet. Ingen analys av konsekvenserna av kapslar som fastnat i borrhålet under deponeringen eller scenarier av missöden redovisas.

En viktig anledning till att inga egentliga säkerhetsanalyser har genomförts för deponering i djupa borrhål är att det i dagsläget inte finns tillräcklig kunskap om förhållandena på stora djup för att man ska kunna genomföra en säkerhetsanalys på ett meningsfullt sätt. Förvarskonceptet djupa borrhål och dess funktion har emellertid belysts i ett antal studier, som främst SKB låtit genomföra från slutet av 1980-talet (se kapitel 1).

Det kan vara värt att notera att SKB:s arbeten med djupa borrhål internationellt betraktas som de mest genomarbetade. Detta framgår till exempel av den genomgång av djupa borrhål som den brittiska motsvarigheten till SKB, UK Nirex Ltd (numera del av National Decommissioning Authority, NDA) genomförde 2004 /Nirex 2004/, liksom i en bred tvärvetenskaplig utredning av kärnkraftens förutsättningar som publicerats vid Massachusetts Institute of Technology /MIT 2003/. Det kan därför sägas att det råder en internationell samsyn om säkerhetsprinciper och barriärfunktioner vid deponering i djupa borrhål, som kan sammanfattas som följer:

Den *primära* säkerhetsfunktionen hos slutförvaret är:

- mycket långsam grundvattenströmning på deponeringsdjup tack vare låg vattengenomsläpplighet och densitetsskiktning skapad av hög salthalt.

Inneslutning och fördröjning i de tekniska barriärerna (kapsel och buffert) är svåra att tillgodoräkna sig som säkerhetsfunktioner. Anledningen är dels att kapselns och buffertens tillstånd efter deponering inte kan kontrolleras och verifieras, dels att den aggressiva miljön på de aktuella djupen kan reducera livslängden på tänkbara kapselmateriäl.

Den *sekundära* säkerhetsfunktionen är därför, liksom för KBS-3-metoden:

- att den naturliga bergbarriären starkt fördröjer frigjorda radionuklider från kapslarna.

Baserat på den modell av grundvattenförhållandena på stora djup som redovisas i avsnitt 3.2.2 och *Figur 3-2*, förutses grundvattenrörelserna på stora djup vara mycket långsamma, särskilt på platser med flack topografi. Anledningen till de långsamma grundvattenrörelserna är dels att bergets vattengenomsläpplighet förmodas vara låg på detta djup, dels att grundvattnet på stora djup kan förväntas vara salt och därmed ha en högre densitet (täthet) än mer ytligt liggande grundvatten.

Som redan nämnts förkortar de aggressiva kemiska förhållandena (hög salthalt, högt tryck och hög temperatur) livslängden hos tänkbara kapselmateriäl. Vidare går det inte att kontrollera och verifiera de tekniska barriärernas täthet efter genomförd deponering av det använda bränslet. Man kan därför inte i säkerhetsanalysen tillgodoräkna sig någon långsiktig inneslutningseffekt av de tekniska barriärerna. Som redovisats i avsnitt 4.2.2 är även själva deponeringsförfarandet förknippat med risker att kapslarna skadas. Dessa förhållanden innebär att det finns en risk att förvaret kommer att innehålla kapslar som initialt är otäta och radionuklider kan frigöras. Det finns även en risk att skadade kapslar fastnar högre upp i borrhålet på ett sätt att så att radionuklider kan frigöras, se vidare nedan.

I /Grundfelt och Wiborgh 2006/ har preliminära krav på delsystemen vid slutförvaring i djupa borrhål formulerats. Dessa funktionskrav sammanfattas i *Tabell 6-1*.

I avsnitten 6.3.2 och 6.3.3 har ett försök gjorts att beskriva hur ett slutförvar för deponering i djupa borrhål kan komma att utvecklas i framtiden och vilka effekterna kan bli i form av stråldoser (referensutveckling), respektive att formulera de frågor som man bör ställa i en scenarioanalys. Beskrivningarna bygger på /Grundfelt och Wiborgh 2006/ och /Nirex 2004/, samt på diskussioner med SKB:s experter.

### 6.3.2 Referensutveckling och risker

De yttre förutsättningarna i form av utveckling av klimat och klimatrelaterade processer är rimligtvis desamma för deponering i djupa borrhål som för KBS-3-metoden. Genom att de båda slutförvarstyperna skiljer sig väsentligt åt i barriärutformning och den relativa vikten mellan de olika barriärernas skyddsfunktion, får man olika grad av påverkan av klimatrelaterade processer på förvarets inneslutande funktion.

När anläggningen är under uppförande och drift grundläggs de tillstånd och de egenskaper som slutförvarets olika delsystem kommer att ha vid förslutningen och som påverkar den långsiktiga säkerheten. Listan över slutförvarets delsystem enligt *Tabell 6-1* kan i detta avseende reduceras till att omfatta *kapseln, bufferten, förslutningen* och den naturliga *bergbarriären*. Med utgångspunkt i vad som ovan sagts och de beskrivningar som givits i /Grundfelt och Wiborgh 2006/, beskrivs nedan vad som kan sägas om dessa delsystems tillstånd efter förslutningen och hur de kan förväntas utvecklas. Beskrivningen görs utgående från de principiella barriärfunktionerna inneslutning och fördröjning.

**Tabell 6-1. Delsystemkrav vid deponering i djupa borrhål.**

Delsystem	Delsystemet ska:
Kapsel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• vara tät vid deponering och helt innesluta det använda kärnbränslet</li> <li>• motstå de mekaniska belastningarna vid deponering</li> <li>• ha försumbar inverkan på de övriga barriärernas säkerhetsfunktioner</li> <li>• kunna hanteras och deponeras på ett säkert sätt</li> <li>• kunna tillverkas med hög tillförlitlighet enligt specifikation</li> <li>• kunna kontrolleras mot specificerade acceptanskriterier</li> </ul>
Buffert	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ha så låg hydraulisk konduktivitet att den advektiva* transporten är låg</li> <li>• hålla kapseln centrerad i borrhålet</li> <li>• ha försumbar påverkan på de övriga barriärernas säkerhetsfunktioner</li> <li>• kunna upprätthålla sina säkerhetsfunktioner under lång tid</li> <li>• kunna installeras enligt specifikation med hög tillförlitlighet</li> <li>• kunna kontrolleras mot specificerade acceptanskriterier</li> </ul>
Infodring	<ul style="list-style-type: none"> <li>• motverka bergutfall och håldeformation</li> <li>• medge säker deponering av kapsel och buffert</li> <li>• tillåta expansion av bufferten så att den får kontakt med berget</li> <li>• inte signifikant påverka bergets och de övriga barriärernas säkerhetsfunktioner</li> <li>• kunna installeras med hög tillförlitlighet enligt specifikation</li> <li>• kunna kontrolleras mot specificerade acceptanskriterier</li> </ul>
Förslutning	<ul style="list-style-type: none"> <li>• förhindra intrång</li> <li>• begränsa advektiv transport i borrhålet</li> <li>• vara långsiktigt beständig</li> <li>• inte signifikant påverka barriärernas säkerhetsfunktioner</li> <li>• kunna installeras enligt specifikation med hög tillförlitlighet</li> <li>• kunna kontrolleras mot specificerade acceptanskriterier</li> </ul>
Borrhål	<ul style="list-style-type: none"> <li>• medge att kapsel och buffert som uppfyller säkerhetskraven kan deponeras</li> <li>• medge att förslutning som uppfyller säkerhetskraven kan installeras</li> <li>• inte signifikant påverka bergets och de övriga barriärernas säkerhetsfunktioner</li> <li>• med hög tillförlitlighet kunna borras enligt specifikation</li> <li>• kunna kontrolleras enligt specificerade acceptanskriterier</li> </ul>
Berget	<ul style="list-style-type: none"> <li>• isolera slutförvaret från biosfären</li> <li>• fördröja radionuklidtransporten till biosfären</li> </ul>

\* Advektiv transport = transport av ett ämne eller konstant egenskap med en vätska eller gas som förflyttas (Wikipedia).

## **Kapseln**

Den tid under vilken en deponerad kapsel kan förväntas förbli tät under rådande förhållanden, kapsellivslängden, beror på kapselmaterialets korrosionsbeständighet och på de mekaniska påfrestningar som kapseln utsätts för. Under kapselns livslängd är det använda kärnbränslet inneslutet. Som påpekats i avsnitt 4.2.2 finns det dock en tydlig risk för att kapslar skadas redan vid deponeringen. Dessutom finns det inga möjligheter att kontrollera kapslarnas täthet efter deponeringen. Vid en bedömning av den långsiktiga säkerheten måste man därför anta att ett antal kapslar från början är skadade på ett sådant sätt att deras inneslutningsfunktion gått förlorad.

Det finns i dag ingen underbyggd analys av vilken livslängd kapslar av olika material kan antas ha vid den temperatur, de salthalter och de mekaniska påfrestningar som kan antas råda i deponeringshålet. Som påpekats i avsnitt 2.2 är det osäkert om det går att uppnå långa kapsellivslängder, även med kvalificerade kapslingsmaterial, i den aggressiva miljö som kan antas råda i ett förvar på aktuellt djup. Som nämnts kan man därför inte tillgodoräkna sig en absolut inkapsling av det använda bränslet under mycket lång tid. Baserat på den tid det tar att reducera det använda bränslets farlighet med ungefär en faktor 10 har ett krav att kapseln ska ha en livslängd 1 000 år formulerats /SKB 2000/. En reduktion med ytterligare en faktor 10 skulle kräva en livslängd på 50 000 år.

Efter förlust av kapselns täthet får man anta att vatten kommer in i kapseln och börjar angripa bränslet. En förutsättning för att man ska kunna beskriva hur oxidation och upplösning av bränslematrisen sker, är att man har information om vattenkemin på det aktuella djupet. Många faktorer som används för att beskriva bränsleupplösningen, såsom till exempel strålningsintensitet, radionuklidinnehåll, tryck och vattenflöde, kan förväntas vara desamma som i KBS-3. Det som skiljer sig tydligt mellan de båda förvarstyperna är emellertid grundvattnets högre saltinnehåll och högre temperatur i djupa borrhål. Dessa faktorer kan förväntas påverka upplösningshastigheten. Den förhöjda temperaturen kan förväntas öka upplösningshastigheten medan det inte självklart hur en hög salthalt påverkar upplösningen.

Den hastighet med vilken nuklider frigörs från bränsle i skadade kapslar kan komma att begränsas av kapselskadans storlek och huruvida skada fylls med till exempel korrosionsprodukter. Storleken på detta motstånd är beroende av storleken på kapselskadan. Vid stora skador, till exempel om en kapsel skjutas av vid en jordbävning, blir skadorna på kapseln sannolikt så stora att transportmotståndet blir försumbara, varvid själva upplösningssprocessen kommer att styra den takt med vilken radionuklider tillförs bufferten. Vid mindre skador, till exempel frätgropar, kan dock transportmotståndet vid uttransporten från kapseln komma att vara betydelsefullt.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att kapselns primära barriärfunktion är dess inneslutande förmåga. Vid deponering i djupa borrhål finns det inga tillgängliga metoder att verifiera kapslarnas täthet efter deponering, att göra en underbyggd skattning av kapselns livslängd i den aktuella miljön eller att upplösning av bränslet och transport av radionuklider från kapseln till bufferten som kan förväntas om en kapsel är otät. På grund av de förväntade temperaturerna och salthalterna kan det vara svårt att använda befintliga data för korrosion och nuklidfrigörelse.

## **Buffert**

Bufferten bidrar till kapselns isolerande funktion genom att den begränsar tillförseln till kapseln av korrosiva ämnen från grundvattnet och skyddar kapseln mekaniskt. Båda dessa funktioner är starkt beroende av buffertens densitet och svällningsförmåga. Mellan dessa parametrar finns det ett samband. Densiteten är bland annat beroende av mängdförhållandet mellan deponeringsslurry och de högkompakterade bentonitblocken samt av graden av homogenisering. Densiteten och svällförmågan påverkas även av miljön i borrhålet, till exempel av salthalt och temperatur. Som beskrivs i avsnitt 4.2.2 råder det stora osäkerheter om vilken densitet som kan åstadkommas och hur denna kan förväntas utvecklas med tiden under de betingelser som råder i borrhålet. I /SKB 2000/ pekar man på att de detaljerade processerna vid homogenisering av block och deponeringsslurry måste analyseras noggrant, för att lämplig slutdensitet och sammansättning ska uppnås.

Den resulterande buffertdensiteten kan förväntas bli lägre vid deponering i djupa borrhål än i KBS-3. Förutom att detta påverkar transporthastigheterna till och från de deponerade kapslarna, leder det lägre portrycket till att man inte kan utesluta förekomsten av mikrobiell aktivitet i närheten av kapslarna. Detta kan påverka bland annat korrosionshastighet på kapslar och foderrör.

Vid deponering i djupa borrhål är det inte möjligt att kontrollera vilken kvalitet bufferten har under eller efter deponeringen. Detta innebär att buffertens funktion att skydda kapselns isolerande förmåga blir svår att tillgodosäkra sig i en säkerhetsanalys, vilket i sin tur innebär att man får anta att kapseln utsätts för de korrosiva ämnen som kan finnas i grundvattnet.

Fördröjningsprocesser i bentonitbufferten har studerats ingående för de förvarsförhållanden som gäller i KBS-3-konceptet. Vissa av dessa erfarenheter kan användas när fördröjningen i bufferten ska bedömas i konceptet djupa borrhål. Resultaten är däremot inte direkt överförbara eftersom temperaturen och grundvattenkemin, då främst salthalten, skiljer sig markant. Den höga salthalten kan minska buffertens sorptionskapacitet när det gäller vissa ämnen och påverka buffertens svälltryck på ett negativt sätt (svälltrycket är lägre vid högre salthalt). Vidare kan den höga temperaturen leda till att omvandlingsprocesser i bufferten går fortare i jämförelse med i KBS-3-metoden. Detta gör att buffertens sorptionsegenskaper kan förändras med tiden. I många fall kan även jämvikten mellan sorberade och lösta radionuklider förskjutas om temperaturen förändras. Förutom grundvattenkemin och temperaturen beror fördröjningsparametrarna även av buffertens sammansättning och densitet.

### **Förslutningen**

Förslutningens huvudsakliga funktion är att förhindra intrång i förvaret, att förhindra och fördröja en vertikalt advektiv transport i borrhålet och att förhindra olovlig befattning med kärnämne. Vidare ska förslutningen göra det möjligt att i en framtid utnyttja förvarsplatsen, åtminstone de ytliga delarna, för andra ändamål. För att förslutningen ska vara effektiv erfordras en effektiv tätning mellan pluggningsmaterialet och berget, inklusive en tätning av den zon runt borrhålet som störs på grund av anläggandet av hålet. En permanent icke-permeabel infodring av borrhålet äventyrar kontakten mellan pluggningsmaterialet och berget och får därför ses som icke önskvärd. En sådan infodring är nödvändig under borrning och deponering. För att öka förutsättningarna för en effektiv tätning av borrhålet borde den tas bort helt innan förslutning av borrhålet. Detta bedöms dock vara svårt eftersom infodringen är mycket tung och dessutom sannolikt är fastgjuten mot berget.

I den nedre förslutningszonen (500–2 000 m) där tätningen föreslås ske med kompakterade bentonitblock, förväntas transport- och fördröjningsegenskaperna variera så att den undre delen har samma transport- och fördröjningsegenskaper som bufferten på förvarsdjup, medan den hydrauliska konduktiviteten i den övre delen förväntas vara lägre så att transporten är diffusionsstyrd (jämför med bufferten i KBS-3-metoden på samma djup). I den övre delen av den nedre förslutningszonen förväntas även bentonitbuffertens fördröjningsegenskaper, det vill säga sorptionskapacitet och porositet, vara jämförbara med dem framtagna för KBS-3-metoden, eftersom den kemiska miljön på denna nivå är mer lik miljön i ett KBS-3-förvar.

### **Bergbarriären**

Vid deponering i djupa borrhål utgörs slutförvarets huvudsakliga skyddsfunktion av den fördröjning av radionuklider som fås tack vare den låga vattenomsättningen som förväntas på stora djup. Som beskrivits i avsnitt 3.2.2 antas normalt att grundvattnet i flacka områden i södra Sverige är salt under cirka 1 000 meters djup, med en successiv övergång från sött till salt vatten mellan 500 och 1 000 meter. Vidare bedöms den hydrauliska konduktiviteten vara låg på stora djup, även om vattenförande sprickor förekommer. Kombinationen av dessa faktorer innebär att det vatten som återfinns på stora djup i flacka landskap förmodligen har varit stagnant under mycket långa tider. Ett sådant system kan också förväntas förbli stabilt under lång tid om förhållandena förblir ostörda.

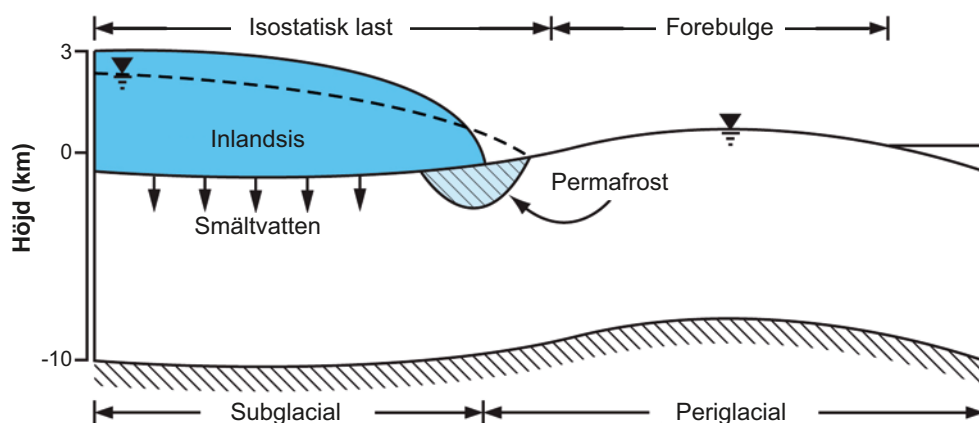
När ett slutförvar enligt konceptet djupa borrhål byggs i en sådan formation introduceras potentiella flödesvägar längs borrhålet i form av en störd zon med ökad sprickighet och ett borrhål med en återfyllnad av ett buffertmaterial, bestående av en blandning av svällande lera och vatten. Vidare medför såväl anläggandet av deponeringshålen, som deponeringen av använt bränsle, risker för en påverkad gradientbild genom att sötvatten introduceras vid anläggande av bufferten, att bränslet genererar värme samt att gasbildning från korrosion av foderrör och kapsel kan ge en lyfteffekt på vattnet i borrhålet.

Genomförda beräkningar /Marsic et al. 2006/ indikerar att den värmeutveckling som fås från det deponerade bränslet inte är tillräcklig för att väsentligen minska de beräknade strömningstiderna. Detta överensstämmer även med de resultat som /Claesson et al. 1992/ fick vid sina beräkningar av värmedriven strömning i och omkring ett djupt borrhål i ett berg med salt grundvatten. Dessa beräkningar visar att den maximala termiskt orsakade uppåtriktade förflyttningen av grundvatten är 60–70 meter. Beräkningarna visar dessutom att denna slutsats gäller oberoende av avståndet mellan borrhålen så länge detta överstiger cirka 200 meter.

Förändringarna hos klimatrelaterade processer såsom permafrost, inlandsis och strandlinjeförskjutning som beskrivs för den cirka 100 000 åriga referensutvecklingen av ett KBS-3-förvar, gäller även vid en analys av deponering i djupa borrhål. Förutsättningarna för slutförvaret att klara av de ökade påfrestningarna i anslutning till nedisning är emellertid väsentligt annorlunda. Vid deponering i djupa borrhål är fördröjningen på grund av den förväntat mycket långsamma omsättningen av grundvattnet slutförvarets huvudsakliga säkerhetsfunktion, medan de tekniska barriärerna, kapseln, bufferten och förslutningen, inte kan förväntas erbjuda något egentligt skydd. Den primära säkerhetsfunktionen kan i samband med framtida nedisningar påverkas av ett förväntat ökat grundvattenflöde (inklusive nedträngning av smältvatten med låg salthalt), av permafrost och av glacialt initierade jordskalv. Effekterna illustreras i *Figur 6-2* /Jaquet och Siegel 2006/. Med dagens kunskap kan vissa saker sägas om de initierande processerna, men mycket litet om effekterna på slutförvarets långsiktiga säkerhet.

Stora förändringarna i grundvattenflöde i ett 100 000 års perspektiv förväntas bland annat i samband med nedisningar /SKB 2006c, d, Jaquet och Siegel 2003, 2006/. Den största påverkan på den hydrauliska gradienten och därmed på grundvattenrörelsen, fås när den branta isfronten avancerar eller drar sig tillbaka över förvarsområdet, se bl.a. /Vidstrand et al. 2010a/. Effekterna dämpas dock av att isfrontens rörelse sker över ett permafrostlandskap och att tillbakadragandet sker med en betydligt flackare isfront samt dessutom med en förhöjd havsnivå /Vidstrand et al. 2010a, SKB 2006d, 2010b/.

I samband med isfrontens passage över ett förvarsområde är det troligt att övergångszonen mellan det ytliga grundvattnet med låg salthalt och det djupare liggande salta grundvattnet påverkas och såväl upplyftning (upconing) som förskjutning nedåt är att vänta under isfrontens passage. Under den period då förvarsområdet är täckt av inlandsisen förväntas en svag men kontinuerlig uppåtransport av salt från större djup /Vidstrand et al. 2010a, b/. Sammantaget medför dessa effekter att de stagnanta grundvattenförhållanden som råder på stora djup riskerar att bli mindre stabila. Effekterna kan förväntas bli mindre i den undre delen av ett förvar än i den övre, på grund av det större avståndet till övergångszonen. Resultaten av modellberäkningar av grundvattensituationen under isfrontens avancemang visar kvalitativt att effekter på grundvattnet i form av förändringar i tryck, salthalt och flödes hastigheter är möjliga på djup som motsvarar deponeringszonen (2–4 kilometer) /Vidstrand och Rhén 2010/. Effekterna på dessa djup är emellertid starkt beroende av vilka egenskaper och salthalter som ansatts i beräkningarna. Det bör samtidigt noteras att inga beräkningar av radionuklidtransport från de djup som är aktuella vid deponering i djupa borrhål har genomförts eftersom det saknas tillräckliga data för att kunna kvantifiera de processer som påverkar en sådan transport.



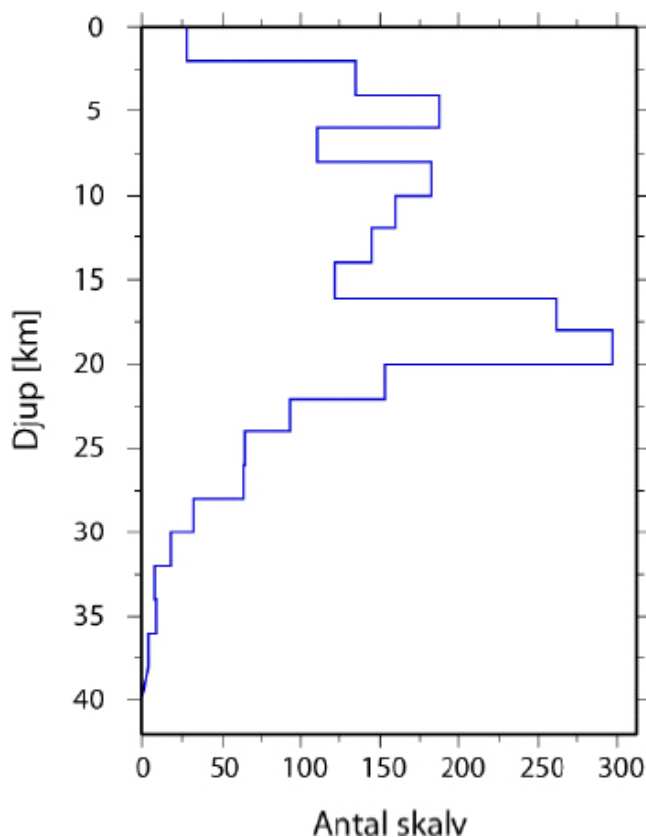
**Figur 6-2.** Konceptuell modell av grundvattenprocesser och tektoniska processer runt fronten av en inlandsis, efter /Jaquet och Siegel 2006/.

Permafrost kan förväntas påverka de övre delarna av förslutningszonen genom frysning. Denna fråga har även behandlats vad gäller bufferten för KBS-3, se avsnitt 6.2.3. Vid deponering i djupa borrhål befinner sig delar av förslutningen ovanför det djup till vilket frysningsfronten uppges nå (200 meter) vilket kan leda till försämring av förslutningsmaterialets egenskaper. Under en istidscykel kan man förvänta sig upprepade fryscykler /SKB 2006c, d, Näslund 2007/.

Statistik över 2 081 jordskalv som inträffade i Sverige mellan augusti 2000 och januari 2007 visar att jordskalvsfrekvensen är högre på de djup som skulle vara aktuella för deponering i djupa borrhål än på de djup som är aktuella för ett KBS-3-förvar /Näslund 2007/. I *Figur 6-3* visas antalet skalv som inträffat på olika djup. Av figuren framgår att skalvfrekvensen under icke-glaciala förhållanden är fem till sex gånger högre i djupintervallet 2–6 kilometer än i de övre två kilometrarna.

I anslutning till att en inlandsis kommer och går, kan man förvänta sig en ökad frekvens av jordskalv /Johnston 1987, Johnston et al. 1998, Lund 2005/. Det är sannolikt att djupfördelningen hos glaciala skalv, med avseende på den ”tysta zonen” med få skalv i de översta 1–2 kilometrarna och den undre seismogena zonen med många skalv, är lik fördelningen i *Figur 6-3*. Skjuvspänningarna i den översta delen av jordskorpan är i dag generellt lägre än de som krävs för att orsaka skalv och även om de glacialt inducerade böjspänningarna tenderar att vara stora i övre delen av skorpan, är det inte troligt att de kommer att ackumuleras tillräckligt för att orsaka en signifikant ändring av förhållandet mellan antalet skalv på 1–2 kilometers djup och antalet på cirka fem kilometers djup.

De flesta skalven i *Figur 6-3* har låg magnitud. Endast tolv skalv har en magnitud som överstiger 3. Under vissa delar av en istid kan en ökande skalvaktivitet förväntas. Man kan då även förvänta sig fler skalv med en magnitud som överskrider 3. Dessa större skalv kommer företrädesvis att äga rum på större djup än de översta 1–2 kilometrarna.



**Figur 6-3.** Djupfördelning av alla jordskalv registrerade av det Svenska Nationella Seismiska Nätet (SNSN) mellan augusti 2000 och januari 2007 (2 081 skalv) /Näslund 2007/. Skalvens magnitud varierar från 1,5 till 3,6. Djupbestämningarna är preliminära men väsentliga förändringar i djupfördelningen för de övre fem kilometrarna förväntas inte vid kommande mer definitiva analyser.

Ett skalv med magnituden 3 kan ske på ett sprickplan med upp till ett par hundra meters radie och påverka spänningsfältet på ett avstånd av upp till omkring en kilometer från epicentrum. Effekten av ett sådant skalv på ett slutförvar bedöms som liten. Ett skalv med magnituden 5 kan ske på ett sprickplan med radien en kilometer eller mer. Ett sådant skalv skulle potentiellt kunna orsaka transportvägar från ett slutförvar i djupa borrhål till det mer mobila grundvattensystemet i det ytligare berget /Näslund 2007/. De volumetriska förändringar som uppstår på grund av töjningar och kompressioner i berggrunden i samband med skalv kan bidra till att mobilisera grundvatten, vilket teoretiskt skulle kunna ske även i det salta djupa grundvattnet som utgör den främsta säkerhetsfunktionen vid deponering i djupa borrhål. Observationer från bland annat Island visar att skalv kan leda till betydande mobilisering av grundvattnet /Jónsson et al. 2003/.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att ett slutförvar med deponering i djupa borrhål på 2–4 kilometers djup kan förväntas vara mer exponerat för glaciala skalv än ett KBS-3-förvar på cirka 500 meters djup /Näslund 2007/. Ett skalv skulle kunna skapa transportvägar till ytligare mer mobilt grundvatten och dessutom mobilisera det förväntade stagnanta salta grundvattnet. Eftersom barriäreffekterna från kapseln och bufferten enligt ovanstående resonemang inte med säkerhet kan tillgodoräknas i en säkerhetsanalys av djupa borrhål, måste man sannolikt räkna med att det mobiliserade grundvattnet innehåller radionuklider från det deponerade använda bränslet.

Detta illustrerar det faktum att ett slutförvar med deponering i djupa borrhål blir känsligt för störningar utifrån på grund av att säkerheten baseras på funktionen av endast en barriär, den naturliga bergbarriären med det stagnanta salta grundvatten som förväntas på stora djup i berget vars stabilitet riskerar att rubbas i samband med jordbävningar /Näslund 2007/.

### 6.3.3 Scenarioanalys och risker

I den scenarioanalys för KBS-3 som gjordes i SR-Can, se avsnitt 6.2.3, ställdes ett antal frågor om barriärerna i slutförvaret på något sätt skulle kunna förlora sina inneslutande och fördröjande funktioner. Motsvarande analys finns inte genomförd för deponering i djupa borrhål. Den förenklade säkerhetsanalys som /Brady et al. 2009/ redovisar omfattar inte motsvarande typ av scenarier. I föreliggande studie har scenarioanalysen begränsats till en relativt kortfattad genomgång av hur de centrala barriärfunktionerna vid deponering i djupa borrhål skulle kunna störas.

Vid deponering i djupa borrhål är slutförvarets centrala barriärfunktion fördröjningen i den naturliga bergbarriären med den mycket långsamma omsättning av det salta grundvatten som antas finnas på stora djup i berget. De centrala frågor som bör ställas i en scenarioanalys av deponering i djupa borrhål blir då:

- Kan det salta grundvattnet på stora djup förträngas, mobiliseras eller på annat sätt destabiliseras?
- Finns det mekanismer som kan korta av grundvattenströmningstiderna från deponeringszonen till det mobila grundvattnet?

Som beskrivits i avsnitt 4.2.2. är deponeringen av det använda bränslet i djupa borrhål förknippat med risker för att kapslar kan fastna eller skadas. Det är därför rimligt att i en scenarioanalys ställa sig frågan:

- Vad händer om en kapsel fastnar så högt upp i ett borrhål att den befinner sig i mobilt grundvatten med låg salthalt?

Eftersom det inte finns någon utvecklad och etablerad teknik för deponering av kapslar med använt kärnbränsle i fyra kilometer djupa borrhål, finns det inte heller någon möjlighet att bedöma hur stor risken är för att en kapsel ska fastna i borrhålet så, att den befinner sig i mer mobilt grundvatten. Som beskrivits i avsnitt 4.2.2 finns det emellertid ett flertal riskmoment i samband med deponeringen som kan leda till att kapslar fastnar.

### 6.3.4 Resultat från analys av den långsiktiga säkerheten

Analys av den långsiktiga säkerheten är inte möjlig att genomföra på grund av allt för stora osäkerheter i ingående data.

## 6.4 Sammanfattning

	KBS-3	Djupa borrhål
Förutsättningar för genomförande av säkerhetsanalys	Säkerhetsanalysen har utvecklats under 30 år. Tekniken väl etablerad.	Data saknas för analys.
Antal barriärer	Ett flerbarriärssystem där barriärerna enskilt och tillsammans innesluter och fördröjer radionukliderna.	Den enda verksamma barriären är naturliga bergbarriären med sitt djupa salta grundvatten som kan förväntas vara stagnant.
Förväntad risk under "normala förhållanden"	Underskrider av myndigheterna satta riskgränser.	Ej analyserad. Förväntas vara låg.
Känslighet för hanteringsmissöden.	Deponeringen kan ske under kontrollerade och verifierbara förhållanden. Missöden under hanteringen av kapslarna är reparerbara och påverkar inte den långsiktiga säkerheten.	Risk för att hanteringsmissöden leder till att kapslar irreversibelt hamnar i fel position. Kan leda till nuklidfrigörelse från skadade kapslar som befinner sig ovanför deponeringszonen.
Känslighet för extern påverkan, till exempel nedisning och jordskalv	Har analyserats. Klarar förväntade förändringar i extern påverkan.	Den långsiktiga säkerheten förutsätter att det djupa salta grundvattnet förblir stagnant även under och efter en nedisning. Detta kan i dagsläget inte säkerställas.
Kvalitetssäkring	Inplacering av buffert, kapslar och förslutning är verifierbar, vilket innebär att man i säkerhetsanalysen kan vara säker på dessa barriärers initialtillstånd.	Det är inte möjligt att verifiera att kapslar och buffert är intakta efter deponeringen.
Resultat från analys av den långsiktiga säkerheten	I SR-Can framgår att en slutförvaring i Forsmark klarar myndigheternas riskkriterium. Analysen har gett feedback till många viktiga frågor.	En meningsfull analys av den långsiktiga säkerheten kan inte genomföras med dagens kunskap.



## 7 Fysiskt skydd, kärnämneskontroll och återtag

Fysiskt skydd innebär att på olika sätt förhindra stöld av kärnämne och kärnavfall, men också att skydda kärntekniska anläggningar mot sabotage och angrepp, som skulle kunna leda till radiologiska risker. Kärnämneskontroll (Nuclear Safeguards) är namnet på åtgärder som syftar till att bokföra och rapportera innehav av kärnämne med syftet att förhindra att kärnämne används för otillåten framställning av kärnvapen.

### 7.1 Fysiskt skydd

För kärntekniska anläggningar måste det finnas en plan för det fysiska skyddet som ska vara godkänd av SSM, innan anläggningen får tas i drift.

Regler för hur fysiskt skydd ska anordnas finns i SSM:s föreskrifter om fysiskt skydd av kärntekniska anläggningar (SSMFS 2008:12) som i detta sammanhang är tillämpliga på anläggningar för slutlig förvaring av kärnämne eller kärnavfall som inte slutgiltigt förslutits. Regler finns även i IAEA:s konvention om fysiskt skydd av kärnämne, SÖ 1985:24, från år 1980.

Det fysiska skyddet ska vara uppbyggt av en kombination av tekniska, administrativa och organisatoriska åtgärder:

- Flerfaldiga skyddsbarriärer i form av till exempel områdesskydd runt en anläggning, skalskydd i en byggnadskonstruktion och skydd av särskilda utrymmen.
- Tillträdeskontroll som säkerställer att endast behöriga personer ges tillträde.
- Personell bevakning med särskilt utbildade väktare.
- Teknisk övervakning till exempel i form av larmdetektorer och övervakningskameror.
- Instruktioner och åtgärdsplaner vid till exempel obehörigt intrång.
- Samverkan med polisen.

Ett KBS-3-förvar respektive ett slutförvar för deponering i djupa borrhål skiljer sig åt i vissa avseenden när det gäller förutsättningarna för fysiskt skydd. Medan ett KBS-3-förvar har ett fåtal ingångar som behöver bevakas, kommer området kring vart och ett av de djupa borrhål där deponering pågår (cirka 4–8 hål, se avsnitt 4.2.2) att behöva utrustas för ett effektivt fysiskt skydd med strikt tillträdeskontroll, områdesövervakning etc. Det senare torde vara väsentligt mer resurskrävande än det fysiska skyddet som krävs för ett KBS-3-förvar.

### 7.2 Kärnämneskontroll

Sverige skrev år 1968 under det så kallade icke-spridningsavtalet, vilket innebär att vi förbundit oss att använda kärnenergi enbart för fredliga syften och att svenskt kärnämne får kontrolleras av FN:s atomenergiorgan IAEA. Eftersom Sverige är medlem i EU kontrolleras allt svenskt kärnämne även av EU:s kontrollorgan Euratom. SSM ansvarar för att Sverige uppfyller alla internationella avtal på icke-spridningsområdet. Allt kärnämne i Sverige bokförs och rapporteras till SSM och EU:s kontrollorgan. Transporter av kärnämne omfattas av speciella regler och tillstånd ges av SSM. Detta görs för att man hela tiden ska veta var kärnämnet finns och hur mycket som finns, så att den världsomfattande kontrollen kan fungera.

I kontrollsystemet kommer kapseln att utgöra en redovisningsenhet. Varje kapsel får en unik beteckning som noteras och kapselns innehåll dokumenteras. Även all förflyttning av kapseln dokumenteras i kontrollsystemet. Innan deponering kontrolleras kapselns beteckning samt att kapselns förslutning är obruten. Vid slutförvarets mynning kan mätutrustning finnas som känner av om transportbehållaren innehåller använt bränsle eller inte. På så sätt kan kontrolleras att inget använt bränsle utan tillstånd förs in eller ut ur slutförvaret.

En annan viktig komponent i systemet för kärnämneskontroll är att kunna verifiera att anläggningen har byggts i enlighet med de ritningar som presenterats. Detta för att kunna visa att det inte finns vägar ut från anläggningen som inte har angivits eller att det inte finns utrymmen där annan verksamhet förekommer än vad som har angivits. Det innebär att kontrollorganen kommer att behöva genomföra inspektioner innan och under byggandet av anläggningen samt under drift och vid förslutning.

Eventuellt återtag av kapslar ställer också krav på systemet för kärnämneskontroll. Det gäller att kapslarnas identitet otvetydigt ska kunna fastställas och det även i ett långtidsperspektiv, vilket ställer krav på märkningen av kapslarna. Även informationen om kapslarnas innehåll behöver bevaras. Samma principer kan tillämpas vid återtag, transport och mellanlagring som gäller för de olika momenten vid deponering av kapslar.

Ett program för kärnämneskontroll ska enligt gängse betraktelsesätt bedrivas till dess det klyvbara materialet ska vara *praktiskt oåtkomligt*. IAEA anger att ett slutförvar som innehåller signifikanta mängder av klyvbart material kräver en övervakning som är tillräcklig för att tidigt upptäcka icke tillåtna rörelser av materialet /IAEA 2001/. En expertgrupp utsedd av /IAEA 2005/ menar att man vid deponering av använt bränsle, utan föregående upparbetning, måste bedriva kärnämneskontroll även efter slutförvarets förslutning. SKB deltar i internationella program som drivs genom IAEA och som syftar till att ta fram krav på ett system för kärnämneskontroll för ett geologiskt slutförvar. De lösningar som diskuteras inriktar sig främst på att ansvarigt kontrollorgan genom olika former av övervakning ska kunna säkerställa att ingen otillbörlig verksamhet pågår med syftet att återta det använda bränslet. Det större djupet vid deponering i djupa borrhål medför rimligen större svårigheter att otillbörligen komma över det använda bränslet. Det är dock klart att oavsett vilket slutförvarsalternativ man väljer, utgör otillbörligt återtag av använt kärnbränsle från ett förslutet slutförvar en storskalig operation som knappast kan bedrivas i ett ordnat samhälle utan upptäckt.

### 7.3 Möjligheter till återtag

SKB har vid försök i Äspölaboratoriet demonstrerat att det är möjligt att på ett säkert sätt ta tillbaka kapslar, som deponerats enligt KBS-3-metoden. Det är möjligt både under själva deponeringsprocessen och efter det att deponeringstunneln fyllts igen och bentoniten runt kapseln vattenmättats och svällt. Men, i fallet med svällt bentonit, måste tunneln rensas och bentoniten runt kapseln tas bort, innan kapseln kan lyftas. I båda fallen lyfts kapseln upp och in i deponeringsmaskinen.

Det är inte avsikten med KBS-3-metoden att kapslar som deponerats ska återtas efter förslutning av förvaret, men även det är möjligt. Det skulle i så fall kräva omfattande åtgärder och stora resurser under lång tid.

För kapslar som deponerats i djupa borrhål är möjligheterna små, att på ett säkert sätt ta upp och hantera kapslar som fastnat eller skadats under deponering. Återtag efter förslutning bedömer inte SKB som realistiskt.

## 7.4 Sammanfattning

	KBS-3	Djupa borrhål
Fysiskt skydd	Få ingångar att bevaka.	Varje borrhål där deponering pågår utgör en anläggning som kräver åtgärder för fysiskt skydd.
Kärnämneskontroll Nödvändigt att med verifierbara ritningar kunna styrka att alla tillträden till anläggningen är kontrollerade och att kontrollen utesluter otillbörlig verksamhet.	Få ingångar att bevaka.	En ingång till varje borrhål.
Otillbörligt återtag av deponerat använt bränsle	Så storskalig operation att det inte kan fortgå obemärkt.	Så storskalig operation att det inte kan fortgå obemärkt, försvåras ytterligare av det större djupet.
Återtag	Fullt möjligt att på ett säkert sätt ta upp och hantera kapslar i driftskedet. Återtag efter förslutning är möjligt, men kräver stora resurser under relativt lång tid.	Små möjligheter att på ett säkert sätt ta upp och hantera kapslar som fastnat eller skadats under deponering. Återtag efter förslutning är inte realistiskt.

## 8 Ledtider, utvecklingsbehov och kostnader

Av tidigare kapitel i denna rapport framgår att utvecklingsbehovet för deponering i djupa hål är stort, medan KBS-3-metoden har utvecklats så långt att man kan gå vidare med tillståndsansökningar. Nedan beskrivs kortfattat status för de båda slutförvarstyperna vad avser ledtider, utvecklingsbehov och kostnader. Vidare diskuteras konsekvenserna av dessa ledtider i form av icke-tekniska projektrisker.

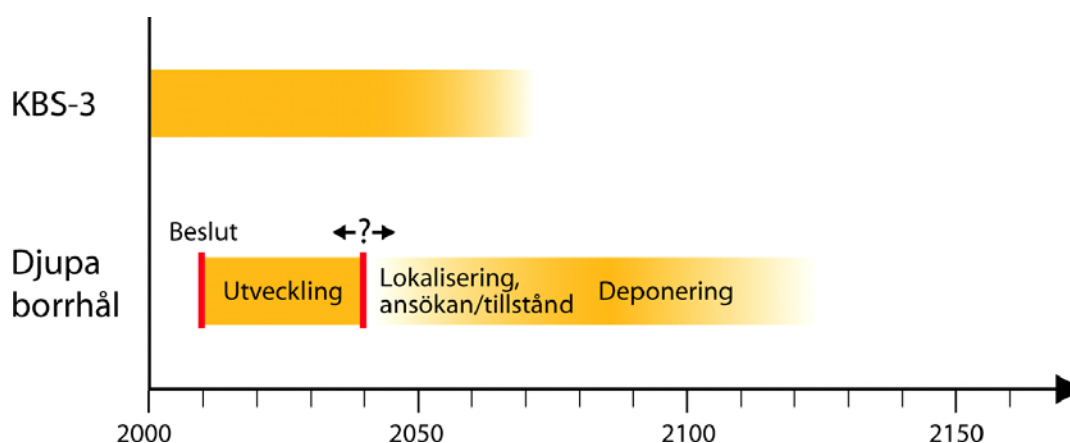
### 8.1 Ledtider och utvecklingsbehov

De centrala återstående anläggningarna i ett slutförvar som bygger på KBS-3-metoden är en inkapslingsanläggning och slutförvarsanläggningen. Det förordade alternativet för lokalisering av inkapslingsanläggningen är i anslutning till Clab (Centralt mellanlager för använt kärnbränsle) i Oskarshamns kommun. I november 2006 lämnade SKB in en ansökan enligt kärntekniklagen om att få uppföra och inneha en inkapslingsanläggning för använt kärnbränsle och om att få driva denna gemensamt med Clab.

Efter slutförda platsundersökningar i Oskarshamns och Östhammars kommuner beslutade SKB i juni 2009 att välja Forsmark som plats för slutförvaret för använt kärnbränsle. Planerna är att under 2010 färdigställa ansökningar om de tillstånd som krävs för uppförande och drift av slutförvaret.

Efter regeringens beslut om vilket underlag SKB måste redovisa inför valet av platser för platsundersökningar, initierade SKB i januari 2000 en utredning om omfattning och innehåll i det Fud-program skulle behövas för att bringa kunskapen om djupa borrhål till samma nivå som det då rådande kunskapsläget för KBS-3-metoden. I rapporten /SKB 2000/ dras slutsatsen att det skulle krävas ett drygt 30-årigt Fud-program. Mot bakgrund av vad som redovisas tidigare i denna rapport kan man notera att det är mycket osäkert om genomförandet av ett sådant Fud-program skulle resultera i ett förvarskoncept som ur säkerhetssynpunkt är bättre än KBS-3. Kanske måste man efter en sådan jämförelse överge metoden för att återgå till att satsa på KBS-3 eller något annat.

I *Figur 8-1* illustreras de tidsperspektiv som med dagens kunskap ses som rimliga för de båda förvarstyperna. Deponeringen av använt kärnbränsle kan vara avslutad om 60–70 år om man nu väljer slutförvaring enligt KBS-3-metoden, medan man med deponering i djupa borrhål får en mycket osäker tidsplan. Först om 100–120 år, räknat från i dag, antas allt kärnbränsle vara deponerat.



*Figur 8-1.* Illustration av möjliga tidsplaner för slutförvaring enligt KBS-3-metoden respektive deponering i djupa borrhål.

## 8.2 Kostnader

Kostnaderna för omhändertagandet av kärnkraftens radioaktiva restprodukter beräknas regelbundet med i lag fastställt intervall och presenteras av SKB i så kallade Planrapporter. Planrapporterna ligger efter en granskning av SSM till grund för regeringens beslut om vilka avgifter som ska tas ut från reaktorinnehavarna för att täcka kostnaderna för omhändertagandet av det använda kärnbränslet och den framtida rivningen av kärnkraftverken. Den senaste rapporten, Plan 2008 /SKB 2008/, är den 27:e rapporten och publicerades i december 2008. I rapporten redovisas dels hittills nedlagda kostnader (utfall till och med 2007 jämte prognos för 2008 och budget för 2009) respektive beräknade framtida kostnader uppdelat på ett antal poster. Den uppskattade totalkostnaden för lokalisering, platsundersökning, projektering, uppförande, drift och förslutning av ett slutförvar för använt kärnbränsle enligt KBS-3-metoden är drygt 27 miljarder kronor varav cirka tre miljarder kronor utgörs av hittills nedlagda kostnader. Dessa kostnader baserar sig på referensscenariot för drift av reaktorerna, det vill säga 50 års drift för reaktorerna i Forsmark och Ringhals samt 60 års drift för Oskarshamnverket.

Om man väljer att utforska möjligheterna att deponera det använda kärnbränslet i djupa borrhål uppstår kostnader för det Fud-program som skulle krävas för att kunskapen om deponering i djupa borrhål skulle komma upp på den nivå där kunskaperna om KBS-3-metoden ligger i dag. SKB har uppskattat dessa kostnader till 4,2 miljarder kronor i penningvärdet år 2000 /SKB 2000/.

Som nämnts ovan är det i dagsläget osäkert om resultatet av ett sådant Fud-program skulle visa att deponering i djupa borrhål skulle leda till ett slutförvar som är säkrare än ett KBS-3-förvar. Om vi ändå antar att så är fallet skulle lokalisering, platsundersökning, projektering, uppförande, drift och förslutning ge upphov till kostnader. /Harrison 2000/ uppskattar kostnaden för borring av ett deponeringshål till 4,65 miljoner euro (ca 44 miljoner kronor). Denna kostnad inkluderar bara borring och infodring av hålet. Kostnaden omfattar således inte borring och loggning av pilothål, testning i deponeringshålet eller deponering av kapslar. Harrison förutsätter vidare att hammarborring används med ett styvt skum som borrhålsvätska. Som visats i avsnitt 4.1.2 bedöms denna teknik inte lämplig för anläggande av djupa borrhål.

/Sperber 2007/ anger kostnaden för ett fyra kilometer djupt borrhål, med diametern 0,445 meter inklusive loggning och installation av foderrör, till 186 miljoner kronor. Om man antar att kostnaden är proportionell mot hålets tvärsnittsarea /Sperber 1994/ och räknar om denna kostnad till ett hål med diametern 0,8 meter fås en kostnad på cirka 600 miljoner kronor för ett hål.

/Juhlin och Sandstedt 1989/ gjorde en uppskattning av kostnaderna för anläggning av ett deponeringshål och deponering av kapslarna på 554 miljoner kronor i dåtidens penningvärde. Om man drar bort den uppskattade deponeringskostnaden på 137 miljoner kronor och räknar om den kvarvarande anläggningskostnaden till dagens penningvärde, fås en anläggningskostnad på 655 miljoner kronor för ett deponeringshål. Deponeringskostnaden kan uppskattas från en ungefärlig dagskostnad för en rigg på 330 000 kronor per dag och en uppskattad tidsåtgång för ett hål på 5–10 månader till mellan 50 och 100 miljoner kronor per hål.

Sammantaget ger dessa grova skattningar en kostnad för anläggande av ett deponeringshål inklusive deponering, men exklusive förslutning, på 650–750 miljoner kronor. För en anläggning med 60 deponeringshål (referensscenariot för kraftverkens drifttider, se ovan) blir den uppskattade totalkostnaden alltså 29–34 miljarder kronor. Till denna kostnad ska läggas den ovan nämnda kostnaden för genomförandet av ett Fud-program på 4,2 miljarder kronor, kostnader för lokalisering och platsundersökningar av en anläggning, kostnader för anläggning och drift av ovanmarksanläggningar vid borrhålen, kostnader för förslutning av borrhålen, etc. Eftersom varje deponeringshål kräver en egen ovanmarksanläggning med utrustning och bemanning för fysiskt skydd, strålskydd, etc kan man räkna med att kostnaderna för investering, drift och underhåll för dessa anläggningar totalt kommer att vara högre än för en KBS-3-anläggning.

### 8.3 Icke-tekniska projektrisker

I tiden utdragna projekt löper risken att samhällsliga förändringar påverkar förutsättningarna för projektets förverkligande. /Björne och Hallin 2006/ studerade denna fråga för att specifikt besvara frågan om samhället kommer att ha en kapacitet att garantera ett skydd för det använda kärnbränslet i tidsperspektivet 75–100 år och om samhället kommer att kunna åstadkomma ett slutförvar vid en senare tidpunkt. Som illustreras i **Figur 8-2** behöver samhället ha såväl finansiell som institutionell och teknisk kapacitet för att kunna ta hand om det använda kärnbränslet och garantera ett skydd. Den centrala slutsatsen av studien är att kapaciteten att ta hand om det använda kärnbränslet riskerar att påtagligt försvagas i ett 75–100 års perspektiv. Författarna påpekar att man med ett slutförvar enligt KBS-3-metoden, eller någon modifierad variant av denna, kommer att kunna ha tagit hand om allt använt kärnbränsle inom ramen för det utredda 75 års perspektivet, medan en förlängd lagring i Clab ökar osäkerheterna om samhället kommer att ha kapaciteten att på ett säkert sätt omhänderta det använda kärnbränslet.

### 8.4 Sammanfattning

	KBS-3	Djupa borrhål
Ledtider	Tillståndsansökningarna under framtagande. Deponering kan troligen avslutas inom 60–70 år.	Tillståndsprocessen kan tidigast påbörjas om cirka 30 år. Deponeringen kan avslutas om 100–120 år.
Status för kostnadskalkyler	Väl genomarbetade. Rapporteras regelbundet till Strålsäkerhetsmyndigheten i enlighet med lagkrav.	Mycket osäkra, bland annat på grund av att den teknik som behöver användas inte är utvecklad.
Kostnad för lokalisering, platsundersökning, projektering, uppförande, drift och förslutning (ej inkapsling)	27 miljarder kronor varav 3 miljarder kronor redan nedlagda kostnader.	29–34 miljarder kronor + 4,2 miljarder kronor för FoU + kostnader för lokalisering, platsundersökning samt anläggning och drift av ovanmarksanläggningar vid borrhålen.
Icke-tekniska projektrisker	Befintliga samhällsliga resurser kan utnyttjas.	Senareläggningen av det slutliga omhändertagandet av det använda kärnbränslet ökar risken att samhällets resurser och förmåga att slutligt ta hand om bränslet kan gå förlorade.



**Figur 8-2.** Illustration av kritiska faktorer för samhällets förmåga att ta hand om det använda kärnbränslet.

## 9 Diskussion och slutsatser

Föreskrifter i svensk lagstiftning och i internationella överenskommelser ger uttryck för samhällets krav på hantering och slutförvaring av använt kärnbränsle från kärnkraftverken. Med utgångspunkt i dessa krav har SKB definierat syftet med arbetet att omhänderta det använda kärnbränslet enligt följande:

*SKB:s syfte är att bygga, driva och försluta ett slutförvar med fokus på säkerhet, strålskydd och miljöhänsyn. Slutförvaret utformas så att olovlig befattning med kärnbränsle förhindras, både före och efter förslutning. Den långsiktiga säkerheten ska baseras på ett system av passiva barriärer.*

*Slutförvaret är avsett för använt kärnbränsle från de svenska kärnreaktorerna och ska skapas inom Sveriges gränser med frivillig medverkan av berörda kommuner.*

*Slutförvaret ska etableras av de generationer som dragit nytta av de svenska kärnreaktorerna och utformas så att det, efter förslutning förblir säkert utan underhåll eller övervakning.*

I denna rapport presenteras en jämförelse av KBS-3-metoden för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle med deponering av det använda bränslet i djupa borrhål. KBS-3-metoden bygger på resultaten av drygt 30 års forskning. Under denna period har vid ett flertal tillfällen andra metoder och utformningar, däribland deponering i djupa borrhål, studerats och värderats. Deponering i djupa borrhål har i samtliga dessa utvärderingar bedömts ha sämre förutsättningar än KBS-3-metoden, att utgöra en fullgod lösning för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle.

Jämförelsen mellan metoderna i denna rapport görs med utgångspunkt från ett antal centrala frågeställningar: förutsättningar för val av förläggningsplats, förutsättningar för uppförande, deponering och förslutning, kärnteknisk säkerhet vid hantering av inkapslat använt kärnbränsle, långsiktig säkerhet för ett förslutet förvar, fysiskt skydd och kärnämneskontroll samt planeringsförutsättningar i form av ledtider, utvecklingsbehov och kostnader. I Tabell 9-1 sammanställs de huvudsakliga konceptskiljande faktorerna inom de olika frågeställningarna. Tabellen utgör en sammanställning av de tabeller som redovisats i de olika avsnitten i rapporten.

Alla kärnkraftsländer ser geologisk slutförvaring inom egna gränser som huvudalternativ och detta medför att deponeringsalternativen styrs av befintlig geologi. Detta leder till att man i Finland, Kanada och Sverige förutser en slutförvaring i kristallint berg medan man i Belgien, Frankrike och Schweiz riktar huvudintresset mot leror. I Tyskland har man historiskt sett bergsalt som ett huvudalternativ. Under de senaste fem till sex åren har man dock i ökande grad sett sig om efter andra alternativ såsom leror. I USA har man studerat slutförvaring i omättad tuff (sintrad vulkanisk aska) för det högaktiva avfallet. Sedan man dragit tillbaka en ansökan om tillstånd att uppföra ett slutförvar vid Yucca Mountain, är fortsättningen av programmet oklar. Transuraninnehållande låg- och medelaktivt avfall från det militära programmet slutförvaras i en anläggning i bergsalt i New Mexico.

I samtliga dessa länder ser man tunnelbaserade deponeringsanläggningar som huvudalternativ. Inget land överväger djupa borrhål som huvudlinje för slutförvaring av civilt kärnkraftsavfall. I USA, liksom i Storbritannien, diskuteras deponering i djupa borrhål av speciella avfallstyper med små volymer, till exempel plutonium från skrotning av kärnvapen. I Sydafrika har man tagit fram ett koncept med deponering i grunda borrhål (några tiotal meter) av främst uttjänta lågaktiva strålkällor.

Det pågår i dag ingen utveckling av deponering i djupa borrhål inom kärnkraftindustrin i världen. Metoden har ingått i flera sammanställningar och utvärderingar, till exempel i /MIT 2003/ anges att den teknikutveckling som skett sedan 1980-talet inom borrhållning och borrhållsmätningar på stora djup gör metoden potentiellt mer attraktiv. Man gör dock ingen egen ytterligare utvärdering, utan lutar sig i stor utsträckning mot SKB:s Pass-studie. Vidare gör NDA i Storbritannien en bred genomgång av konceptet /Nirex 2004/. Även NDA konstaterar dock att SKB:s genomgång i Pass-projektet är den mest ingående utvärderingen som har gjorts.

/Baldwin et al. 2008/ gör en utvärdering av möjligheterna att anpassa olika slutförvarskoncept till olika geologiska miljöer. Man konstaterar där att det saknas utvärderingar av säkerheten för bland annat deponering i djupa borrhål och att uppgifter om kostnader för olika koncept inte är jämförbara.

/Brady et al. 2009/ redovisar en mycket preliminär och förenklad analys av konsekvenserna av radionuklidtransport längs borrhålet vid deponering av bränsleelement från tryckvattenreaktorer på ett djup av 3–5 kilometer i ett borrhål med diametern 0,445 meter. I rapporten görs en genomgång av relevansen av olika *Features, Events and Processes*, FEPs, för deponering i djupa borrhål. Det konstateras allmänt att de FEP:s som är specifika för deponering i djupa borrhål kräver väsentliga arbetsinsatser innan de kan sorteras och värderas på ett robust och trovärdigt sätt. I rapporten görs ingen utvärdering av till exempel scenariot att en kapsel (eventuellt skadad sådan) fastnar på fel nivå eller att densitetsskiktningen i grundvattnet destabiliseras av någon anledning.

Det finns i dag inget som pekar på att en övergång till en planering för deponering i djupa borrhål skulle leda till en säkrare slutförvaring av det använda kärnbränslet än vad KBS-3-metoden ger. En övergång till djupa borrhål skulle tvärtom väsentligt försena det slutliga omhändertagandet av det använda kärnbränslet, och därmed äventyra användningen av de samhällsliga resurser som har byggts upp i dag, och sannolikt väsentligt fördyra omhändertagandet. En genomgående slutsats från jämförelsen i denna rapport är att KBS-3-metoden ger ett slutligt omhändertagande av det använda kärnbränslet som är i alla led kontrollerbart och verifierbart, medan denna kontrollerbarhet och verifierbarhet i flera avseenden saknas vid deponering i djupa borrhål.



**Tabell 9-1. Sammanfattning av faktorer som är olika för KBS-3 och deponering i djupa borrhål.**

		KBS-3	Djupa borrhål
Konceptens utformning	Arealbehov på ytan	0,2–0,3 km <sup>2</sup>	Drygt 13 km <sup>2</sup> , vid 500 m mellan hålen. Med aktiv vertikalstyrning och termisk optimering av borrhålen kan arealbehovet minskas betydligt.
	Utschaktat berg	Ca 2 miljoner m <sup>3</sup> varav en del återanvänds för återfyllning av anläggningen och resten kan användas i bygg- och anläggningsprojekt.	Ca 400 000 m <sup>3</sup> som huvudsakligen utgör avfall och måste deponeras.
	Deponering	Ett slutförvar med ca 6 000 deponeringshål. Eftersom deponeringshålen är knappt 10 m djupa kan deponeringsförloppet lätt kontrolleras.	Slutförvaring i ca 60 hål som borrar från markytan. Även deponeringen sker från markytan genom nedsänkning i 4 km djupa hål. Deponeringen bedöms inte kunna övervakas effektivt.
	Primär säkerhetsfunktion	Total inneslutning i tekniska barriärer som skyddas av en stabil och kontrollerbar geologisk och geokemisk miljö.	Fördröjning i berget tack vare de långa transporttider som fås som en följd av stagnant grundvatten. Det stora djupet gör det omöjligt att undersöka miljön i den deponerade kapselns omgivning.
Val av förläggningsplats	Geologiska krav	Stabila mekaniska förhållanden	Någorlunda isotropa spänningsförhållanden.
	Hydrogeologiska och hydrokemiska krav	Reducerande miljö, vattensammansättning som inte skadar bufferten eller kapseln.	Sammanhängande område med grundvatten med hög salthalt. Begränsad förekomst av konduktiva zoner.
	Kännedom om berggrunden	Mycket god, genom många års forskning och undersökningar. Möjlighet att i detalj inspektera samtliga deponeringshål.	Bristfällig, få borrhål fördelade över ett stort område, i flera fall i irrelevant geologi. Begränsade möjligheter att i detalj inspektera det berg som omger individuella kapslar.
	Undersökningsteknik Lokaliseringsarbetet	Etablerad teknik efter 30 års forskning och tillämpning. Har pågått under lång tid. Platsundersökningarna avslutades 2008. Platsval gjordes 2009.	Många undersökningsmetoder måste utvecklas från grunden. Nya platsundersökningar måste initieras.
Uppförande drift och förslutning	Uppförande	Teknik har utvecklats under många år.	Teknik för borrhål av vida hål i granitiskt berg på stora djup finns inte, men kan möjligen utvecklas.
	Deponering	Från tunnlar på cirka 500 m djup. Deponeringshålen är mindre än 10 m djupa, vilket ger observerbar, kontrollerbar och verifierbar deponering.	Från markytan. Hålen flera kilometer djupa, ger mer eller mindre okontrollerad deponering. Initiala kapselskador och kapslar som fastnar på fel nivå i hålet kan inte uteslutas.
	Förslutning	Teknik har utvecklats under många år. Sker på övervakat och kontrollerat sätt.	Från ytan. Teknik saknas i dag för förslutning, kontroll och verifikation. Förslutningsteknik kan möjligen utvecklas.
Säkerhet vid hantering	Kärnteknisk säkerhet	Slutförvaret är <i>en</i> enstaka kärnteknisk anläggning.	<i>Varje</i> borrhål utgör <i>en</i> kärnteknisk anläggning (cirka 60 borrhål i referensscenariet).
	Störningar och missöden	Leder inte till radiologiska konsekvenser. Missöden är reparerbara.	Kan medföra radiologiska konsekvenser. Missöden är inte med säkerhet reparerbara.
	Kontrollerbarhet	Hantering från 500 m djup i hål mindre än 10 m djupa, ger observerbar, kontrollerbar och verifierbar deponering.	Hantering från ytan i flera kilometer djupa hål, utan möjlighet att kontrollera och verifiera att deponeringen skett som avsett.

		KBS-3	Djupa borrhål
Långsiktig säkerhet	Förutsättningar för genomförande av säkerhetsanalys Antal barriärer  Förväntad risk under "normala förhållanden" Känslighet för hanteringsmissöden.  Känslighet för extern påverkan, till exempel nedisning och jordskalv  Kvalitetssäkring  Resultat från analys av den långsiktiga säkerheten	Säkerhetsanalysen har utvecklats under 30 år. Tekniken väl etablerad.  Ett flerbarriärssystem där barriärerna enskilt och tillsammans innesluter och fördröjer radionukliderna.  Underskrider av myndigheterna satta riskgränser.  Deponeringen kan ske under kontrollerade och verifierbara förhållanden. Missöden under hanteringen av kapslarna är reparerbara och påverkar inte den långsiktiga säkerheten.  Har analyserats. Klarar förväntade förändringar i extern påverkan.  Inplacering av buffert, kapslar och förslutning är verifierbar, vilket innebär att man i säkerhetsanalysen kan vara säker på dessa barriärers initialtillstånd.  I SR-Can framgår att en slutförvaring i Forsmark klarar myndigheternas riskkriterium. Analysen har gett feedback till många viktiga frågor.	Data saknas för analys.  Den enda verksamma barriären är naturliga bergbarriären med sitt djupa salta grundvatten som kan förväntas vara stagnant.  Ej analyserad. Förväntas vara låg.  Risk för att hanteringsmissöden leder till att kapslar irreversibelt hamnar i fel position. Kan leda till nuklidfrigörelse från skadade kapslar som befinner sig ovanför deponeringszonen.  Den långsiktiga säkerheten förutsätter att det djupa salta grundvattnet förblir stagnant även under och efter en nedisning. Detta kan i dagsläget inte säkerställas.  Det är inte möjligt att verifiera att kapslar och buffert är intakta efter deponeringen.  En meningsfull analys av den långsiktiga säkerheten kan inte genomföras med dagens kunskap.
Fysiskt skydd, kärnämneskontroll och återtag	Fysiskt skydd  Kärnämneskontroll  Nödvärdigt att med verifierbara ritningar kunna styrka att alla tillträden till anläggningen är kontrollerade och att kontrollen utesluter otillbörlig verksamhet.  Otillbörligt återtag av deponerat använt bränsle  Återtag	Få ingångar att bevaka.  Få ingångar att bevaka.  Så storskalig operation att det inte kan fortgå obemärkt.  Fullt möjligt att på ett säkert sätt ta upp och hantera kapslar i driftskedet. Återtag efter förslutning är möjligt, men kräver stora resurser under relativt lång tid.	Varje borrhål där deponering pågår utgör en anläggning som kräver åtgärder för fysiskt skydd.  En ingång till varje borrhål.  Så storskalig operation att det inte kan fortgå obemärkt, försvåras ytterligare av det större djupet.  Små möjligheter att på ett säkert sätt ta upp och hantera kapslar som fastnat eller skadats under deponering. Återtag efter förslutning är inte realistiskt.
Ledtider utvecklingsbehov och kostnader	Ledtider  Status för kostnadskalkyler  Kostnad för lokalisering, platsundersökning, projektering, uppförande, drift och förslutning (ej inkapsling)  Icke-tekniska projektrisker	Tillståndsansökningarna under framtagande. Deponering kan troligen avslutas inom 60–70 år.  Väl genomarbetade. Rapporteras regelbundet till Strålsäkerhetsmyndigheten i enlighet med lagkrav.  27 miljarder kronor varav 3 miljarder kronor redan nedlagda kostnader.  Befintliga samhällliga resurser kan utnyttjas.	Tillståndsprocessen kan tidigast påbörjas om cirka 30 år. Deponeringen kan avslutas om 100–120 år.  Mycket osäkra, bland annat på grund av att den teknik som behöver användas inte är utvecklad.  29–34 miljarder kronor + 4,2 miljarder kronor för FoU + kostnader för lokalisering, platsundersökning samt anläggning och drift av ovanmarksanläggningar vid borrhålen.  Senareläggningen av det slutliga omhändertagandet av det använda kärnbränslet ökar risken att samhällets resurser och förmåga att slutligt ta hand om bränslet kan gå förlorade.

## 10 Förkortningar

Clab	Centralt mellanlager för använt kärnbränsle beläget intill Oskarshamns kärnkraftverk.
CoRWM	Committee on Radioactive Waste Management.
EU	Europeiska Unionen.
Fud	Forskning, utveckling och demonstration, beteckning på det program som SKB i enlighet med krav i kärntekniklagen publicerar vart tredje år.
IAEA	International Atomic Energy Agency, FNs Internationella atomenergiorgan.
KBS-3	Metod för deponering av använt kärnbränsle.
KBS-3H	Metod för deponering av inkapslat använt kärnbränsle med horisontell lagring av kapslarna i borrhål i tunnlar.
KBS-3V	Metod med horisontell deponering av inkapslat använt kärnbränsle med vertikal lagring av kapslarna i borrhål i tunnelgolven.
KTB	Kontinentales Tiefbohrprogramm, tyskt program för utforskning av jordskorpan egenskaper med ett ca. 9 000 m djupt hål vid Windischeschenbach nära Bayreuth i den sydöstra delen av delstaten Bayern.
MIT	Massachusetts Institute of Technology, amerikans teknisk högskola.
NDA	Nuclear Decommissioning Authority, organisation som ansvarar för kärnavfallshanteringen i Storbritannien.
Pass	Projekt AlternativStudier för Slutförvar, studie publicerad av /SKB 1992/.
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB.
SKI	Statens kärnkraftinspektion (har upphört och ingår i SSM).
SKIFS	SKIs författningssamling, samlingsbeteckning för föreskrifter utgivna av Statens kärnkraftinspektion (återfinns numera i SSMFS).
SNSN	Svenska Nationella Seismiska Nätet, nät av för närvarande 60 bredbandiga seismiska nätstationer fördelade över landet och uppkopplade till en dator vid Uppsala Universitet.
SR-Can	Säkerhetsstudie av slutförvaring av använt kärnbränsle publicerad av /SKB 2007b/.
SR-Site	Säkerhetsanalys som för närvarande är under framtagning och som utgör en del av de planerade ansökningarna om tillstånd att uppföra ett slutförvar enligt KBS-3.
SSI	Statens strålskyddsinstitut (har upphört och ingår i SSM).
SSIFS	SSIs författningssamling, samlingsbeteckning för föreskrifter utgivna av Statens strålskyddsinstitut (återfinns numera i SSMFS).
SSM	Strålsäkerhetsmyndigheten.
SSMFS	SSM:s författningssamling, samlingsbeteckning för föreskrifter utgivna av Strålsäkerhetsmyndigheten, ersätter SKIFS och SSIFS.
VLJ	Finskt slutförvar för driftavfall från kärnkraftverk beläget intill kärnkraftverket i Olkiluoto.

## 11 Referenser

Publikationer utgivna av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) kan hämtas på [www.skb.se/publikationer](http://www.skb.se/publikationer).

**Andersson C, Johansson Å, 2002.** Boring of full scale deposition holes at the Äspö Hard Rock Laboratory. Operational experiences including boring performance and a work time analysis. SKB TR-02-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Autio J, 1997.** Characterization of the excavation disturbance caused by boring of the experimental full scale deposition holes in the Research Tunnel at Olkiluoto. SKB TR 97-24, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Autio J, Kirkkomäki T, 1996.** Boring of full scale deposition holes using a novel dry blind boring method. SKB TR 96-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Baldwin T, Chapman N, Neall F, 2008.** Geological disposal options for high-level waste and spent fuel. Report for the UK Nuclear Decommissioning Authority.

**Beswick J, 2008.** Status of technology for deep borehole disposal. Report for NDA, Contract NP 01185, EPS International.

**Björne S, Hallin G, 2006.** Annan fara! En studie av samhällets framtida kapacitet för omhändertagande av använt kärnbränsle. SKB R-06-63, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**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 Report SAND2009-4401, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico.

**Bäckblom G, Lindgren E, 2005.** KBS-3H – Excavation of two horizontal drifts at the Äspö Hard Rock Laboratory during year 2004–2005. Work description, summary of results and experience. SKB R-05-44, Svensk Kärnbränslehantering AB.

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

**Claesson J, Hellström G, Probert T, 1992.** Buoyancy flow in fractured rock with a salt gradient in the groundwater. A second study of coupled salt and thermal buoyancy. SKB TR 92-41, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Grundfelt B, Wiborgh M, 2006.** Djupa borrhål – Status och analys av konsekvenserna vid användning i Sverige. SKB R-06-58, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Harrison T, 2000.** Very deep borehole. Deutag's opinion on boring, canister emplacement and retrievability. SKB R-00-35, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**IAEA, 2001.** Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste. IAEA-TECDOC-1208, International Atomic Energy Agency.

**IAEA, 2005.** Multilateral approaches to the nuclear fuel cycle: expert group report submitted to the Director General of the International Atomic Energy Agency. INFCIRC/640, International Atomic Energy Agency.

**ICRP, 2000.** Radiation protection recommendations as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste. Oxford: Pergamon. (ICRP Publication 81; *Annals of the ICRP* 28).

**Jaquet O, Siegel P, 2003.** Groundwater flow and transport modelling during a glacial period. SKB R-03-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Jaquet O, Siegel P, 2006.** Regional groundwater flow model for a glaciation scenario. Simpevarp subarea – version 1.2. SKB R-06-100, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Johnston A C, 1987.** Suppression of earthquakes by large continental ice sheets. *Nature*, 330, pp 467–469.

**Johnston P, Wu P, Lambeck K, 1998.** Dependence of horizontal stress magnitude on load dimension in glacial rebound models. *Geophysical Journal International*, 12, pp 41–60.

- Jónsson S, Segall P, Pedersen R, Björnsson G, 2003.** Post-earthquake ground movements correlated to pore-pressure transients. *Nature*, 424, pp 179–183.
- Juhlin C, Sandstedt H, 1989.** Storage of nuclear waste in very deep boreholes: Feasibility study and assessment of economic potential. Part I Geological considerations. Part II Overall facility plan and cost analysis. SKB TR 89-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Juhlin C, Wallroth T, Smelie J, Eliasson T, Ljunggren C, Leijon B, Beswick J, 1998.** The very deep hole concept – Geoscientific appraisal of conditions at great depth. SKB TR 98-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kukkonen I T (ed), 2004.** Outokumpu deep drilling project. International workshop, Espoo, 25–26 October 2004. Geological Survey of Finland.
- Lund B, 2005.** Effects of deglaciation on the crustal stress field and implications for end-glacial faulting: A parametric study of simple Earth and ice models. SKB TR-05-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Marsic N, Grundfelt B, Wiborgh M, 2006.** Very deep hole concept. Thermal effects on groundwater flow. SKB R-06-59, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- MIT, 2003.** The future of nuclear power: an interdisciplinary MIT study. Boston: Massachusetts Institute of Technology.
- Nirex, 2004.** A review of the deep borehole disposal concept for radioactive waste. Nirex report N/108, United Kingdom Nirex Ltd.
- Näslund J-O, 2007.** Hur kan djupa borrhål påverkas av glaciation? I ”Djupa borrhål: ett alternativ för slutförvaring av använt kärnbränsle? Rapport 2007:6, Statens råd för kärnavfallsfrågor, s 32–35.
- OECD NEA, 1995.** Future human actions at disposal sites: a report from the NEA Working Group on Assessment of Future Human Actions at Radioactive Waste Disposal Sites. Paris: Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Smellie J, 2004.** Recent geoscientific information relating to deep crustal studies. SKB R-04-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 1992.** Projekt AlternativStudier för Slutförvar (PASS). Slutrapport. (Även publicerad på engelska: Project on Alternative Systems Study (PASS). Final report. SKB TR 93-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.)
- SKB, 2000.** Förvaltsalternativet djupa borrhål. Innehåll och omfattning av FUD-program som krävs för jämförelse med KBS-3-metoden. SKB R-00-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2006a.** Slutförvar för använt kärnbränsle Preliminär anläggningsbeskrivning – layout D. Oskarshamn, delområde Laxemar. SKB R-06-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2006b.** Slutförvar för använt kärnbränsle Preliminär anläggningsbeskrivning – layout D Forsmark. SKB R-06-33, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2006c.** Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main report of the SR-Can project. SKB TR-06-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2006d.** Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2007a.** Fud-program 2007, Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2007b.** 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.
- SKB, 2008.** Plan 2008. Kostnader från och med år 2010 för kärnkraftens radioaktiva restprodukter. Underlag för avgifter och säkerheter åren 2010 och 2011. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2009.** Design premises for a KBS-3V repository based on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses. SKB TR-09-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2010a.** Slutförvarsanläggning för använt kärnbränsle, Anläggningsbeskrivning layout D – Forsmark. SKB R-09-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2010b.** Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-49, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Sperber A, 1994.** German KTB project technologies overcome deep drilling challenges. *Petroleum Engineer*, 66, pp 26–30.

**Sperber A, 2007.** Deep boreholes with large diameter in crystalline rock: elaboration of selected aspects. Edemissen: IDEAS Ing.-Büro A. Sperber.

**Vidstrand P, Rhén I, 2010.** On the role of model depth and hydraulic properties for groundwater flow modelling during glacial climate conditions. SKB R-10-74, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Vidstrand P, Rhén I, Zucec N, 2010a.** Groundwater flow modelling of periods with periglacial and glacial conditions – Laxemar. SKB R-09-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Vidstrand P, Follin S, Zucec N, 2010b.** Groundwater flow modelling of periods with periglacial and glacial conditions – Forsmark. SKB R-09-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Åhäll K-I, 2006.** Slutförvaring av högaktivt kärnavfall i djupa borrhål: en utvärdering baserad på senare års forskning om berggrunden på stora djup. MKG Rapport 1, Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskning.