

Geschäftsstelle

Kommission
Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe
gemäß § 3 Standortauswahlgesetz

Bericht der SKB

Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
Stockholm, Schweden, August 2014

<p>Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe K-MAT 26 d</p>

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

Svensk Kärnbränslehantering AB

Augusti 2014

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co

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



ISSN 1651-4416

SKB P-14-21

ID 1440166

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

Svensk Kärnbränslehantering AB

Augusti 2014

Data i SKB:s databas kan ändras av olika skäl. Mindre ändringar i SKB:s databas kommer nödvändigtvis inte att resultera i en reviderad rapport. Revideringar av data kan också presenteras som supplement, tillgängliga på www.skb.se

En pdf-version av rapporten kan laddas ner från www.skb.se.

Förord

Föreliggande rapport redovisar en jämförelse mellan KBS-3-metoden och deponering i djupa borrhål som metod för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle. Som anges i rapportens titel utgör den en uppdatering och aktualisering av en tidigare utgiven rapport med samma syfte (R-10-13).

Rapporten har sammanställts av Bertil Grundfelt vid Kemakta Konsult AB samt granskats av en styrgrupp inom SKB bestående av Erik Setzman, Olle Olsson, Saida Engström, Peter Wikberg och Björn Söderbäck. Värdefulla bidrag i övrigt har lämnats av bland andra Kaj Ahlbom (SKB International), Claes Thegerström (Thegerstrom Consulting AB), Johan Andersson (SKB), Fredrik Johansson (SKB), Anders Odén (QTOB) och Lars Birgersson (Kemakta Konsult AB).

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.

SKB har sedan 1980-talet som en del av ett allsidigt forskningsprogram studerat olika andra metoder för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle. En av de metoder som studerats är deponering i djupa borrhål. I slutet av 1980-talet och början av 1990-talet tog SKB inom Projekt AlternativStudier Slutförvar, Pass, fram en konceptuell utformning av deponering i djupa borrhål. Detta koncept refererades länge internationellt som det mest genomarbetade för deponering i djupa borrhål. Konceptet som utvecklades i Pass-studien byggde på deponering i 0,8 m vida och 4 km djupa borrhål i kristallint urberg, något som ligger klart bortom borrhåndsindustrins erfarenhet. Senare har en samsyn utvecklats att det bör vara möjligt att med tillgänglig teknik borra upp till 0,5 m vida hål till ett djup av ungefär 5 km. Ett sådant koncept har under de senaste cirka fem åren utvecklats av Sandia National Laboratories, SNL, i USA. SKB har beslutat att bygga denna rapport och eventuella framtida arbeten med djupa borrhål på en något modifierad variant av det av SNL utvecklade konceptet. Det modifierade konceptet bygger på att stålkapslar med använt bränsle (1 PWR- alternativt 2 BWR-element per kapsel) kopplas ihop till strängar bestående av 40 kapslar som sänks ner och deponeras på mellan 3 och 5 km djup i borrhål med en diameter på 44,5 cm.

Den huvudsakliga säkerhetsfunktionen för djupa borrhål och KBS-3 skiljer sig åt i väsentliga avseenden. Den primära säkerhetsfunktionen för KBS-3-metoden är inneslutning av bränslet i kopparkapslar. Kopparkapseln omges av en buffert av kompakterad bentonit som skyddar kapseln mot såväl kemisk som mekanisk påverkan. Berget bidrar till skyddet genom att ge gynnsamma förhållanden. Om kapseln skulle förlora sin inneslutande funktion erbjuder fördröjningen i bufferten och berget en sekundär säkerhetsfunktion. Vid deponering i djupa borrhål är den huvudsakliga säkerhetsfunktionen den fördröjning som fås genom att grundvattnet på deponeringsdjup antas vara stagnant genom en kombination av den densitetsskiktning som fås genom att det djupa grundvattnet är salt och bergets låga genomsläpplighet.

Skillnaderna i säkerhetsfunktion medför att delvis olika krav ställs på förläggningsplatsen och det berg som ska rymma slutförvaret. De krav som ställs på berget runt ett KBS-3-förvar har utvecklats under lång tid och omfattar de gynnsamma kemiska, hydrogeologiska, termiska samt grundvattenströmnings- och transportförhållanden som skyddar bufferten och kapselns inneslutande förmåga. Samma egenskaper bidrar även till den sekundära säkerhetsfunktionen, retardation. Vid deponering i djupa borrhål är kraven inte lika utvecklade och bör istället vara inriktade på att det ska finnas ett tillräckligt stort lågpermeabelt område med salt grundvatten och låg frekvens av konduktiva sprickzoner.

Sedan andra halvan av 1980-talet har SKB lagt ner ett stort arbete på en lokaliserings- och förankringsprocess baserad på KBS-3-metoden. Denna har lett fram till att kompletta platsundersökningar genomförts i två områden, Forsmarksområdet i Östhammars kommun respektive Laxemar i Oskarshamns kommun. I juni 2009 beslutade SKB att välja Forsmark som förläggningsplats för slutförvaret. Våren 2011 lämnade SKB in ansökningar till Mark- och miljödomstolen och Strålsäkerhetsmyndigheten om tillstånd enligt miljöbalken respektive kärntekniklagen för att få uppföra, inneha och driva en slutförvarsanläggning enligt KBS-3-metoden i Forsmark och en inkapslingsanläggning i anslutning till Clab (Centralt lager för använt bränsle) vid Simpevarp i Oskarshamns kommun. Platsundersökningarna har visat att de krav som man har ställt på berget uppfylls vid den planerade förläggningsplatsen i Forsmarksområdet.

Förhållandena på de djupa (3–5 km) som skulle vara aktuella för deponering i djupa borrhål är betydligt mindre kända. Det finns endast ett fåtal borrhål som borrats till aktuellt djup i kristallint berg i områden med förhållanden som i övrigt är jämförbara med de förhållanden som kan antas råda i områden som skulle kunna vara aktuella för deponering i djupa borrhål i Sverige. Utgående från den knapphändiga tillgängliga informationen har en modell utvecklats i vilken grundvattnet på djup under 1–1,5 km i flacka områden har en salthalt på 50–100 gram per liter medan det salta vattnet ligger djupare ner i områden med mer utpräglad topografisk relief. Data tyder på att ursprunget till det salta grundvattnet är växelverkan mellan gammalt meteoriskt vatten och mineraler i berget. Data tyder även på att detta vatten har varit isolerat från ytligare system under ibland flera miljoner år. Samtidigt utgör de hydrogeologiska förhållandena på stora djup ett öppet forskningsområde där det finns stora kunskapsluckor. För att uppnå en sådan ökad förståelse krävs en utveckling av mät- och utvärderingsmetoder eftersom djupet i sig själv liksom bergspänningarna och deras verkningar skapar svårigheter.

Ett slutförvar för använt kärnbränsle är en kärnteknisk anläggning. En sådan anläggning måste utformas så att den uppfyller de regler för utformning och drift av kärntekniska anläggningar som framgår av lagar, förordningar och föreskrifter. En ansökan om tillstånd för att uppföra en slutförvarsanläggning ska bland annat omfatta en redogörelse för hur säkerheten för personal och kringboende ska upprätthållas i anläggningen. En sådan redogörelse för KBS-3-systemet ingår i den ansökan som SKB lämnade in 2011. Det finns inte underlag för att göra motsvarande analys för deponering i djupa borrhål.

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. Det innebär också att anläggningen ska kunna sättas i ett säkert läge om oförutsedda betingelser uppstår. I KBS-3-förvaret har alla moment som behövs för att hantera och deponera det använda bränslet utformats för att åstadkomma en långt gående kontrollerbarhet och verifierbarhet. Vidare har procedurer för att i driftskedet sätta anläggningen i säkert läge, t.ex. genom återtag av deponerade kapslar, utarbetats och testats.

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 samt med risk för kontaminering av borrhålsvätska och verktyg som används för att återställa situationen.

Som nämnts har KBS-3-metoden utvecklats för att vara kontrollerbar och verifierbar i alla steg av processen. Procedurer har utvecklats för att säkerställa att alla delar av systemet uppnår de egenskaper som utgör initialtillståndet i säkerhetsanalysen. Motsvarande kontroll- och verifierbarhet kan inte uppnås vid deponering i djupa borrhål.

De säkerhetsanalyser som genomförts av KBS-3-metoden har visat att slutförvaret med det använda bränslet inneslutet i kopparkapslar omgivna av en bentonitbuffert är motståndskraftigt mot framtida påfrestningar. Summan av de beräknade riskerna ligger med marginal under det riskkriterium som Strålsäkerhetsmyndigheten har satt upp.

I ett slutförvar enligt konceptet djupa borrhål kan ingen eller mycket liten skyddseffekt tillgodoräknas från kapsel och buffert, utan säkerheten vilar så gott som helt på bergbarriärens egenskaper och då särskilt den låga vattenomsättningen på förvarsdjup. Det blir i det läget mycket viktigt att i säkerhetsanalysarbetet undersöka hur robust denna säkerhetsfunktion är mot sådana störningar som slutförvaret ger eller som är effekter av klimatutveckling, geologiska processer, etc. Exempel på störningar från slutförvaret är effekter av den uppvärmning som fås av bränslets resteffekt och av gasutveckling från korrosion av kapslar och foderrör. Exempel på klimateffekter är urspolning av saltvatten och ökad jordskalvsaktivitet vid nedslagningar.

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 ”stöldsäkert” 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 i ett ordnat samhälle.

KBS-3-metoden är i dag så långt utvecklad att SKB våren 2011 kunde lämna in ansökningar om tillstånd att få uppföra och driva ett slutförvar enligt denna metod i Forsmark. Deponering i djupa borrhål befinner sig ännu i ett tidigt utvecklingsskede. SKB gjorde år 2000 bedömningen att det skulle behövas ett forskningsprogram som 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 bland annat till vad som redovisas i denna rapport är det osäkert om ett sådant program skulle leda till att djupa borrhål kan uppfylla säkerhetskraven och vara säkrare än KBS-3-metoden. Om djupa borrhål i det läget skulle visa sig vara en lämplig metod tillkommer tid för lokalisering, projektering samt ansökan och tillstånd.

Det är idag inte möjligt att på ett trovärdigt sätt jämföra kostnaderna för slutförvaring enligt KBS-3-metoden respektive i djupa borrhål eftersom presenterade kalkyler har gjorts med olika förutsättningar för de båda metoderna. Kalkyler för KBS-3-metoden presenteras regelbundet och granskas av Strålsäkerhetsmyndigheten. Eftersom deponering i djupa borrhål befinner sig på ett tidigt utvecklingsstadium är gjorda kalkyler mer spekulativa och omfattar inte alla kostnader för projektering, lokalisering, etc.

Summary

In this report a comparison is made between disposal of spent nuclear fuel according to the KBS-3-method and disposal in deep boreholes. The objective has been to highlight factors that are different between the two methods. The ambition has been to make an as objective comparison as possible, bearing in mind that there are big differences between the methods in terms of both quantity and quality of available data.

The KBS-3-method is based on encapsulation of spent fuel in tight and corrosion resistant copper canisters that are disposed at a depth of about 500 m in Swedish bedrock where they are surrounded by a protecting clay buffer. The method has been developed over a period of more than three decades during which time extensive geoscientific mapping of the upper kilometre of the bedrock has been performed. As a consequence, the knowledge of the conditions in this part of the bedrock is good.

SKB has since the 1980s studied different other methods for the final disposal of spent nuclear fuel as part of a diverse research programme. One of the studied is disposal in deep boreholes. At the end of the 1980s and the beginning of the 1990s, as part of the Project on Alternative Systems Study, Pass, SKB developed a conceptual design of a facility for disposal in deep boreholes. This conceptual design was long referred to internationally as the most developed concept available. The Pass concept was based on disposal in 0.8 m wide and 4 km deep boreholes in crystalline bedrock, boreholes that are far beyond the experience of the drilling industry. Later, a consensus has developed that it should be possible to drill 5 km deep boreholes with a diameter up to about 0.5 m. Such a concept has been developed over the last about five years at Sandia National Laboratories, SNL, in the USA. SKB has decided to base this report and possible future work on a modified variant of the SNL concept. In the modified concept, steel canisters containing spent nuclear fuel (1 PWR alternatively 2 BWR elements per canister) are coupled together to form strings of 40 canisters that are lowered into and disposed at between 3 and 5 km depth in 44.5 cm wide boreholes.

The principal safety function is significantly different for the KBS-3-method and disposal in deep boreholes respectively. For the KBS-3-method, the principal safety function is containment of the spent fuel in copper canisters. The canisters are surrounded by a buffer of compacted bentonite protecting the canister against both chemical and mechanical impacts. The rock contributes to the protection by providing favourable conditions. If the canister would lose its containment function, retardation in the buffer and in the rock would offer a secondary safety function. In deep borehole disposal the principal safety function is retardation through groundwater stagnancy at disposal depth obtained by a combination of density stratification due to the salinity of the deep groundwater and the low permeability of the rock.

The safety function differences imply that different sets of requirements on the host rock are formulated. The requirements on the host rock of a KBS-3-repository have been developed during an extended period of time and include favourable chemical, hydrogeological, thermal as well as groundwater flow and transport properties, which protect the buffer and the canister's ability to maintain containment. The same properties also contribute to the secondary retardation safety function. The requirements on the host rock for deep borehole disposal are less developed and should be focused on the availability of a large enough low-permeability area with saline deep groundwater and low frequency of conductive fracture zones.

Since the second half of the 1980s, SKB has put much work into a siting and public consultation process based on the KBS-3-method. As a consequence, extensive site investigation programmes have been completed at two sites, Laxemar in the Oskarshamn municipality and Forsmark in the Östhammar municipality. In June 2009 SKB decided to choose Forsmark for the siting of a repository. During the spring 2011 SKB filed applications to the Land and Environment Court and the Radiation Safety Authority for permits according to the Environment code and the Act on Nuclear Activities respectively to construct, own and operate a repository according to the KBS-3-method at Forsmark and an encapsulation plant in connection with the Clab facility (Central Spent Fuel Storage) at Simpevarp in the Oskarshamn municipality. The site investigations have shown that the rock at the planned repository host site in the Forsmark area fulfils the requirements formulated.

The conditions at the depths considered for deep borehole disposal (3–5 km) are far less known. There are only a few boreholes drilled to such depth in crystalline rock in areas with conditions that are comparable to those that could be considered for deep borehole disposal in Sweden. Based on the sparse information available, a conceptual model has been developed in which the groundwater below 1–1.5 km depth in areas with a flat topography has a salt content of 50 – 100 g/l, while the saline water in areas with a more distinct topographic relief is found at greater depths. Data indicate that the origin of the salinity is interaction between ancient meteoric water and rock minerals. Also, data indicate that this water has been isolated from more superficial systems for several millions of years. At the same time, the hydrogeological conditions at great depths constitute an open area of research where there are large knowledge gaps. In order to achieve an increased understanding, measurement and evaluation methods need to be developed as the depth itself as well as the rock stresses and their consequences create difficulties.

A repository for spent nuclear fuel is a nuclear facility. Such a facility must of course be designed such that it fulfils the applicable rules for design and operation of nuclear facilities as stipulated in laws, ordinances and regulations. An application for a permit to construct a repository must, *inter alia*, include a statement of how the safety of personnel and the public will be upheld in the facility. Such a statement is included in the application filed in 2011 by SKB. There is not yet a sufficient basis for performing a corresponding analysis of deep borehole disposal.

The handling of spent nuclear fuel according to the KBS-3-method is based on experience from other activities where protection against ionising radiation is important. This means, for example, that the consequences of incidents can be handled in a safe way. In addition, this means that it shall be possible to bring the facility into a safe position if unforeseen conditions arise. In a KBS-3-repository all operations involved in the handling and disposal of the spent fuel have been designed to achieve a far-reaching controllability and verifiability. Moreover, procedures have been developed and tested that ensure that the facility during the operational phase can be brought into a safe position, e.g. by retrieval of disposed canisters.

During deep borehole disposal incidents can occur that cannot be remediated. For example, canisters can be stuck in the borehole before it has reached the intended disposal depth. A possible consequence of this is that a leaking canister is stuck in a borehole section with flowing groundwater without proper buffer protection and with a risk of contaminating the borehole fluid and tools used for remediating the situation.

As mentioned, the KBS-3-method has been developed to be controllable and verifiable in all steps of the process. Procedures to ensure that all parts of the system achieve the initial state that forms the basis of the safety assessment have been developed. The corresponding controllability and verifiability cannot be reached for deep borehole disposal.

The safety assessments that have been performed for the KBS-3-method have shown that a repository with spent fuel encapsulated in copper canisters surrounded by a bentonite buffer is resilient against future stresses. The sum of the calculated risks meets the risk criterion set up by the Radiation Safety Authority with a margin.

In a deep borehole repository none or very little protective effects can be attributed to the canister and buffer. Hence, the safety is entirely based on the properties of the rock barrier and in particular on the low water turnover at the repository depth. As a consequence, an important goal of safety assessment efforts will be to investigate how robust this safety function is against impacts from the repository itself and against impacts from future evolutions of the climate, geological processes, etc. Examples of impacts from the repository are the heating of the system by the residual power of the spent fuel and gas evolution from corroding canisters and casing tubes. Examples of climate effects are flushing out the salt groundwater and increased seismic activity during glaciations.

According to Swedish law, the repository must be designed such that unauthorised handling of nuclear fuel is hindered also after sealing of the repository. It has been argued that the spent fuel, because of the greater depth, would be disposed in a way that is more secure against theft in a borehole repository than in the KBS-3-method. It can be noted that theft also from a sealed KBS-3-repository constitutes a major effort hardly can be performed in secret in an orderly society.

The development of the KBS-3-method is now sufficiently advanced so that SKB in the spring 2011 could file an application for permits to construct and operate a repository according to the method. Deep borehole disposal is, however, still at an early stage of development. In 2000 SKB concluded that it would take a research programme in excess of another 30 years and costing in excess of four billion Swedish kronas to bring the state of knowledge about deep borehole disposal to a level where the two concepts could be compared on an equal basis. Considering the discussion in the current report, it is not certain that such a programme would result in a conclusion that deep borehole disposal can be regarded as safer than the KBS-3-method. If deep borehole disposal should prove to be a suitable method, time in addition to the research programme will have to be allocated for siting, planning and permitting.

Today it is not possible to compare the costs for the KBS-3-method with that of deep borehole disposal in a credible way. Recurring cost calculations for the KBS-3-method has been presented on regular basis and reviewed by the Radiation Protection Authority. As deep borehole disposal still is in an early stage of development, cost calculations performed are more speculative and do not include costs for planning, siting, etc.

Innehåll

1	Inledning	13
2	Anläggningsutformning, uppförande, deponering och förslutning	15
2.1	KBS-3	15
2.1.1	Anläggningsutformning	15
2.1.2	Uppförande	17
2.1.3	Deponering	19
2.1.4	Återfyllning och förslutning	20
2.2	Djupa borrhål	21
2.2.1	Anläggningsutformning	21
2.2.2	Uppförande	24
2.2.3	Deponering	27
2.2.4	Förslutning	30
2.3	Sammanfattning	30
3	Förutsättningar för val av förläggingsplats	33
3.1	Förläggingsplats för KBS-3-förvar	33
3.1.1	Bergets funktion	33
3.1.2	Förutsättningar för att uppfylla bergets funktion	34
3.2	Förläggingsplats för djupa borrhål	35
3.2.1	Bergets funktion	35
3.2.2	Förutsättningar för att uppfylla bergets funktion	36
3.3	Sammanfattning	38
4	Kärnteknisk säkerhet vid hantering	39
4.1	Inledning	39
4.2	KBS-3	39
4.3	Djupa borrhål	41
4.4	Sammanfattning	42
5	Långsiktig säkerhet	43
5.1	Inledning	43
5.2	KBS-3	44
5.2.1	Säkerhetsprinciper och barriärfunktioner	44
5.2.2	Slutförvarets initialtillstånd	44
5.2.3	Referensutveckling och risker	46
5.2.4	Scenarioanalys och risker	48
5.2.5	Resultat från analys av den långsiktiga säkerheten	49
5.3	Djupa borrhål	49
5.3.1	Säkerhetsprinciper och barriärfunktioner	49
5.3.2	Genomförda säkerhetsanalyser och andra studier	50
5.3.3	Referensutveckling och risker	51
5.3.4	Scenarioanalys och risker	55
5.3.5	Resultat från analys av den långsiktiga säkerheten	57
5.4	Sammanfattning	57
5.4.1	Jämförelse av närszonsbarriärer	57
5.4.2	Trolig utveckling för KBS-3	58
5.4.3	Trolig utveckling för deponering i djupa borrhål.	59
5.4.4	Trolig framtida aktivitetsspridningssituation	59
6	Fysiskt skydd, kärnämneskontroll och återtag	61
6.1	Fysiskt skydd	61
6.2	Kärnämneskontroll	61
6.3	Möjligheter till återtag	62

7	Ledtider, utvecklingsbehov och kostnader	65
7.1	Ledtider och utvecklingsbehov	65
7.2	Kostnader	66
7.3	Icke-tekniska projektrisker	66
8	Diskussion och slutsatser	69
	Referenser	75
Bilaga 1	Sammanställning av rapporter som belyser djupa borrhål	79

1 Inledning

I en tidigare rapport (Grundfelt 2010) presenterades en jämförelse mellan deponering av använt kärnbränsle i djupa borrhål och deponering enligt KBS-3-metoden. Jämförelsen omfattade en genomgång av ett antal frågeställningar som alla bedömdes vara av grundläggande betydelse för valet mellan dessa två alternativa handlingsvägar för att slutförvara använt kärnbränsle. De frågeställningar som behandlades var:

- Förutsättningar för val av förläggingsplats.
- 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.

Jämförelsen byggde på den utformning av deponering i djupa borrhål som SKB hade tagit fram i den så kallade Pass-studien (SKB 1992). När den tidigare studien publicerades hade Sandia National Laboratories, SNL, börjat skissa på ett koncept för deponering i djupa borrhål som byggde på smalare borrhål än Pass-konceptet, och den första sammanhållna rapporten om denna utveckling (Brady et al. 2009) refererades i (Grundfelt 2010). Eftersom anläggandet av de smalare borrhålen liksom tekniken för deponering som föreslås av SNL bedöms vara mer realistiskt än motsvarande i Pass-konceptet har SKB beslutat att basera fortsatta utvärderingar på SNL:s koncept.

När det gäller KBS-3-systemet var den senaste säkerhetsanalysen som var tillgänglig under utarbetandet av rapporten från 2010 SR-Can (SKB 2007a). Visserligen var SR-Site (SKB 2011) under framtagande parallellt med utarbetandet av metodjämförelsen, men publiceringen av resultaten från SR-Site skedde efter publiceringen av metodjämförelsen.

I denna rapport presenteras en uppdaterad metodjämförelse som bygger på det av SNL utvecklade konceptet för deponering i djupa borrhål med vissa mindre anpassningar och säkerhetsanalysen SR-Site för KBS-3-metoden. Jämförelsen omfattar samma frågeställningar som i den tidigare rapporten, se punktlistan ovan. Framställningen i rapporten har begränsats till deponeringen av tillverkade kapslar. Således har kapseltillverkning och inkapslingsprocess lämnats utanför denna studie.

Det bör noteras att de båda metoderna som jämförs befinner sig på olika utvecklingsstadier. Medan KBS-3 metoden bygger på mer än 30 års samlade erfarenheter inklusive återkommande säkerhetsanalyser befinner sig deponering i djupa borrhål, trots att konceptet funnits med i diskussionerna sedan tidigt 1970-tal (se t.ex. U.S.AEC 1974), ännu på ett konceptstadium. En anledning till detta är att konceptet inte har ingått eller ingår som huvudalternativ i något nationellt program för omhändertagande av använt kärnbränsle och radioaktivt avfall. Detta påverkar möjligheterna att göra en i alla avseenden fullvärdig jämförelse mellan metoderna.

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. Flera av de tidigare utländska studierna av djupa borrhål har 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 inklusive anläggningarnas uppförande, deponeringen av det använda bränslet och förslutningen efter avslutad deponering. I kapitel 3–7 behandlas de övriga 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. Huvudscenariot för den beräknade drifttiden för reaktorerna har ändrats något sedan 2007. 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 KBS-3-kapslar.

Inriktning av SKB:s arbete 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)". I Fud-programmen har även SKB:s arbete med andra metoder redovisats. Grundat på bland annat SSM:s utlåtanden har regeringen tillstyrkt att utvecklingsarbete och lokalisering fått fortsätta med KBS-3-metoden som planeringsförutsättning, parallellt med krav på uppföljning av andra metoder.

2 Anläggningsutformning, uppförande, deponering och förslutning

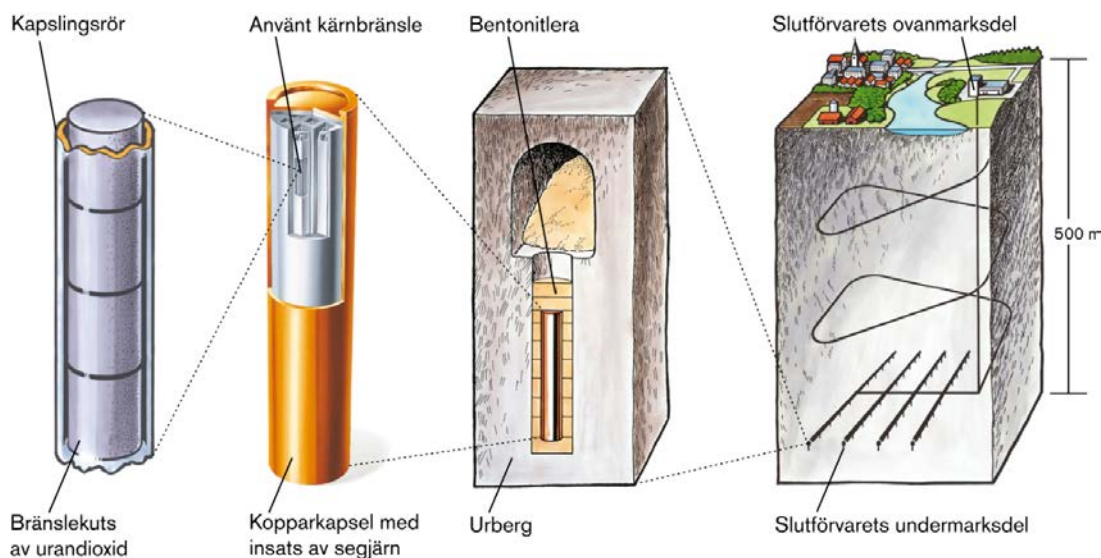
I detta avsnitt jämförs de tekniska utformningarna av anläggningarna, tekniken för anläggningarnas uppförande, de förfaranden för deponering av det använda bränslet samt metoder för förslutning av anläggningarna efter avslutad deponering som förutses i ett slutförvar enligt KBS-3-metoden respektive vid deponering i djupa borrhål. Det bör påpekas att dagens utformning av KBS-3-metoden är ett resultat av utvecklingsarbete som påbörjades under slutet av 1970-talet, medan det beskrivna konceptet för deponering i djupa borrhål fortfarande är på ett tidigt utredningsstadium varför en jämförelse med nödvändighet blir något ojämn.

2.1 KBS-3

2.1.1 Anläggningsutformning

KBS-3-metoden bygger på att det använda bränslet kapslas in i täta lastbärande segjärnskapslar med ett kopparhölje som är motståndskraftigt mot korrosion. Kapslarna deponeras en och en i deponeringshål som borrats i golvet på tunnlar som anlagts på 400–700 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 borrhål. Jämförelsen i denna rapport utgår dock från vertikal lagring av kapslarna (KBS-3V) då denna lösning bedöms tillgänglig och utgör grund för SKB:s tillståndsansökningar.

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 korrosionsframkallande 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.

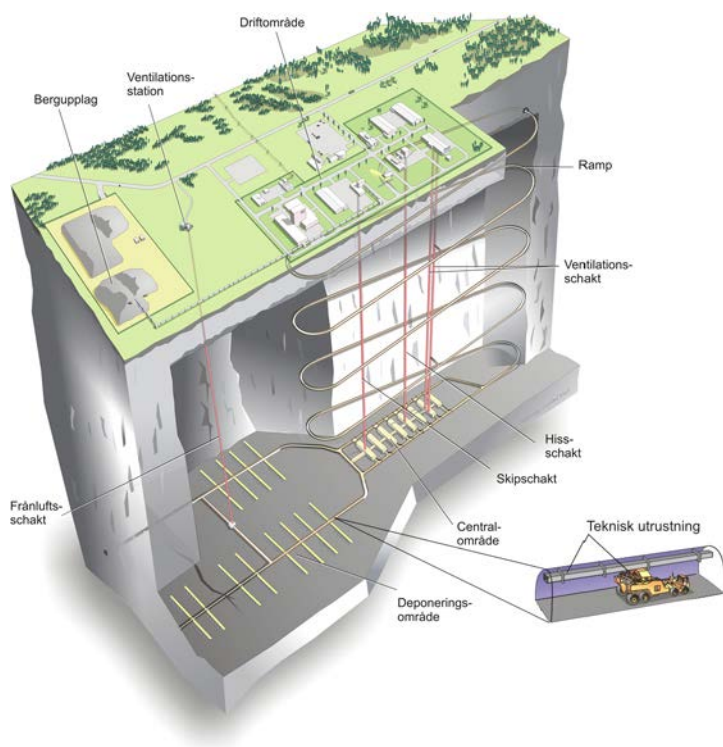


Figur 2-1. KBS-3-metoden för slutförvaring av använt kärnbränsle med vertikal deponering. De punkterade strecken mellan delfigurerna visar det avbildade objektets plats i nästa delfigur.

I figur 2-2 visas en principiell utformning av en slutförvarsanläggning enligt KBS-3-metoden med vertikal deponering. Anläggningen består av en ovanmarksdel med ett driftområde som innehåller diverse servicefunktioner och en förvaringsdel under mark. Ovan- och undermarksdelarna förbinds med en transporttunnel, ett skipschakt för transport av massor samt ett hisschakt. Dessutom finns flera ventilationsschakt varav vissa mynnar på markytan utanför driftområdet.

I referensscenariot med drift av reaktorerna i 50–60 år kommer markbehovet för ovanmarksdelen inklusive ett upplag av utsprängda massor från bygget att vara cirka 0,2 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 2009). 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.

I figur 2-3 visas hur ovanmarksdelen av ett KBS-3-förvar i Forsmark gestaltas under uppförandeskedets slutfas (SKB 2010a). Ovanjordsdelen är indelad i ett yttre och ett inre driftsområde. All kärnteknisk verksamhet är förlagd till det inre driftsområdet som är försett med ett områdesskydd och utgör skyddat område enligt Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrift för fysiskt skydd i kärntekniska anläggningar¹. Alla tillfarter till undermarksdelen, som utgör skyddat område, ligger inom det inre driftsområdet. Inom det yttre driftsområdet finns anläggningar för icke kärntekniska verksamheter som är kopplade till driften, till exempel produktion av buffert- och återfyllnadsmaterial, verkstäder, administration, etc.



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

¹ SSMFS 2008:12.



Figur 2-3. Utformningen av ovanmarksdelen av ett KBS-3-förvar i Forsmark vid uppförandeskedets slut (SKB 2010a).

2.1.2 Uppförande

I princip kan slutförvaret delas in i utrymmen under mark, byggnader och anläggningar på markytan samt tekniska installationer, se figur 2-2. 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 sprängningsskadade zonen runt tunnlar och andra håligheter.
- Behov av plant golv.
- Borrning och inspektion av deponeringshål.
- Begränsning av vatteninflöde samt vattenkemiska förhållanden.

Ett ofta diskuterat fenomen är om, och i så fall i vilken utsträckning, det bildas en s.k. störd zon (EDZ, Excavation Damaged Zone) i berget närmast orter och berggrum vid uttag. Hur zonen ser ut beror på hur utrymmet sprängs eller borrar. Zonens hydrauliska egenskaper skulle, om störningen är alltför stor, kunna påverka förvarets funktion på lång sikt. SKB har valt att planera för berguttag med konventionell borrning och sprängning på grund av metodens flexibilitet och mognad samt för dess relativt låga kostnader såväl vid berguttaget som vid omhändertagandet av de utsprängda massorna (SKB 2010b, 2013a). I dag finns kunskap om hur man kan begränsa utbredningen av den störda zonen genom försiktig och kontrollerad teknik för borrning och sprängning. SKB bevakar även utvecklingen avseende andra metoder än borrning/sprängning, till exempel har det skett en snabb teknikutveckling inom tunnelbormaskiner (TBM).

Utbyggnaden av Äspölaboratoriet som slutfördes i januari 2013 har gett möjlighet att för första gången integrera detaljundersökningar, projektering inklusive tillämpning av observationsmetoden och bergarbeten där kvalitetskrav på utförande tillämpats i produktion.

Utveckling av teknik för anläggande av deponeringhål pågår. Vid Äspölaboratoriet har SKB borrat ett femtontal deponeringshål för olika experiment och demonstrationsprojekt. Dessa har utförts med TBM-teknik, anpassad för att borra vertikalt nedåt (Andersson och Johansson 2002). Vidare har SKB erfarenheter av borring av deponeringshål med omvänd stigortsborring, dels från provborring av tre hål i Posivas undersökningstunnel för VLJ²-förvaret för driftavfall i Olkiluoto, Finland (Autio och Kirkkomäki 1996, Autio 1997), och från borring av långa horisontella deponeringsorter för studier av KBS-3H-varianten i Äspölaboratoriet (Bäckblom och Lindgren 2005).

SKB har valt omvänd stigortsborring som referensmodell. Delvis baserat på SKBs konstruktion har en prototypmaskin enligt denna teknik tagits fram av Posiva, se figur 2-4. Den har redan utnyttjats för att borra ett flertal hål i Posivas ONKALO anläggning. SKB och Posiva samarbetar om utvärderingen av dessa borringar för att ytterligare kunna förbättra tekniken.

När det gäller injektering har utvecklingsarbetet omfattat såväl karakterisering, och materialutveckling som kontroll och styrningsmetoder. Erfarenheter har samlats in såväl från fintättningsprojektet i Äspölaboratoriet som från byggprojekt som Citybanan i Stockholm. Inom ramen för utbyggnaden av Äspölaboratoriet 2012 erhöles mer erfarenhet avseende styrning och optimering av injekteringsarbetet (SKB 2013a). Det fortsatta programmet inriktas mot metoder och strategier för injekteringsarbetet samt mot kvalitetssäkring. Arbeten med att utveckla metoder för karakterisering av den sprängnings-skadade zonen pågår och redovisas i Fud-programmen.

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 borring, sprängning, skrotning och bergförstärkning. Arbetet kommer att utföras med stor precision för att uppfylla de speciella krav som ställs på slutförvaret.



Figur 2-4. En prototypmaskin för borring av deponeringshål som testas just nu av Posiva. Foto: Posiva Oy.

² VLJ är en förkortning av Voimalaitosjätet = Kraftverksavfall

2.1.3 Deponering

I (SKB 2010a) redovisas en beskrivning av de arbetsmoment som ingår i deponeringen av en kapsel. 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 vad gäller genomsläpplighet för grundvattnet.

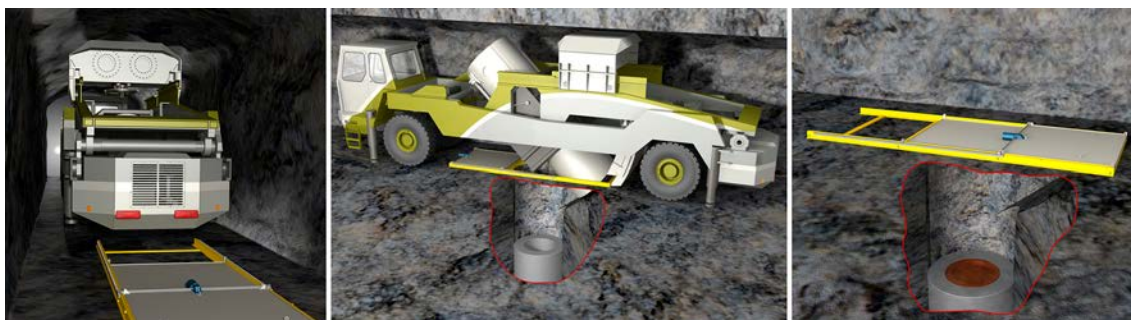
Deponering sker först i det hål som är längst inne i deponeringsorten och avslutas närmast stamtunneln. I sina huvuddrag består hanteringen av inkapslat använt kärnbränsle av följande moment:

- 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 2-5 visas en prototyp av deponeringsmaskinen. I figur 2-6 visas hur deponeringsmaskinen är tänkt att placeras över deponeringshålet med bentonitbuffert.



Figur 2-5. Deponeringsmaskinen Magne tillverkad i Tyskland och levererad till Äspölaboratoriet år 2010 (SKB 2013c).



Figur 2-6. Deponering av kapsel i ett deponeringshål som i förväg har försetts med en buffert av högkompakterad bentonit (SKB 2010a).

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. Anläggningen är dimensionerad för att klara av att ta emot 200 kapslar per år. Den planerade deponeringstakten är 150 kapslar per år (SKB 2010a).

2.1.4 Återfyllning och förslutning

Återfyllning och förslutning utförs i stora drag i följande ordning:

- Deponeringstunnlarna återfylls successivt när alla deponeringspositionerna i en tunnel är utnyttjade.
- När en deponeringstunnel har återfyllts i sin helhet pluggas den genom att betongplugg gjuts i deponeringstunnelns mynning.
- 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.

Enligt gällande planer kommer förslutningen att påbörjas när allt använt kärnbränsle har deponerats och myndigheterna gett sitt tillstånd. 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 och bergkross samt kombinationer av dessa. Tunnlarna, ramper och schakt återfylls och försluts på ett övervakat och kontrollerat sätt. Eventuella svagheter och sprickzoner i berget kan identifieras visuellt och tätas efter behov. Pluggning i rampens och schaktens mynnningar mot markplanet görs för att försvåra obehörigt intrång.

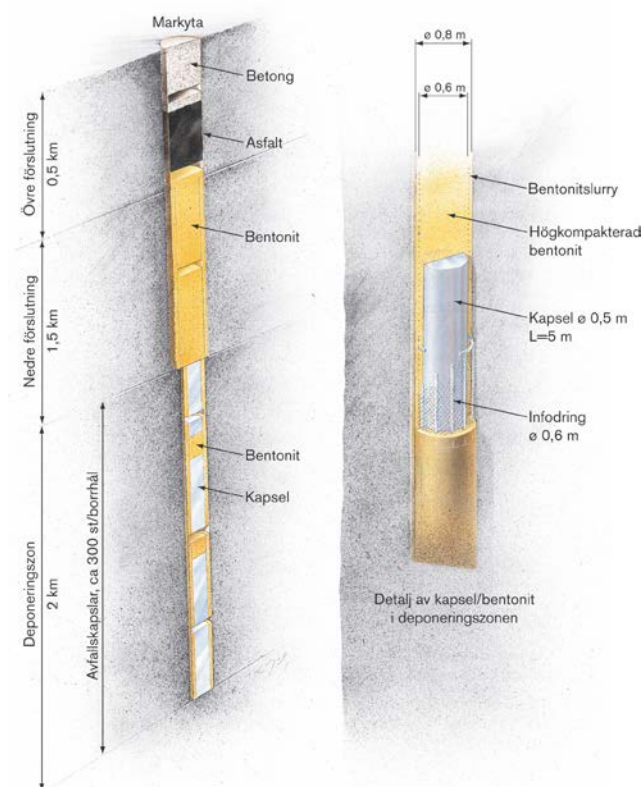
2.2 Djupa borrhål

2.2.1 Anläggningsutformning

Vid deponering i djupa borrhål är det tänkt att inkapslat använt kärnbränsle placeras i vertikala borrhål som borrar från markytan. Förvarskonceptet djupa borrhål har utretts i ett antal studier från slutet av 80-talet och framåt, se bilaga 1 för en sammanställning av viktigare rapporter i vilka deponering i djupa borrhål belyses ur olika aspekter.

Deponering i djupa borrhål beskrevs så tidigt som på 1970-talet (U.S.AEC 1974). SKB tog i den så kallade Pass-studien, Projekt AlternativStudier för Slutförvar (Juhlin och Sandstedt 1989, SKB 1992) fram ett utformningskoncept som byggde på deponering av kapslar med använt kärnbränsle på 2–4 kilometers djup i 80 cm vida borrhål, se figur 2-7. Flera utländska studier om djupa borrhål har sedan baserats på den utformning av konceptet som togs fram av SKB i Pass-studien. I studier från USA (MIT 2003) och Storbritannien (Nirex 2004, Beswick 2008) refereras SKB:s arbeten som de då mest genomarbetade och kompletta.

I de diskussioner som förts kring konceptet har deponeringsdjup mellan två och fem kilometer föreslagits. I det koncept som SKB tog fram i Pass-studien (SKB 1992) kapslades det använda bränslet in i kapslar med en ytterdiameter av 0,5 meter och staplades ovanpå varandra i deponeringszonen mellan två och fyra kilometers djup. I ett deponeringshål rymdes på detta sätt omkring 300 kapslar. Dessa kapslar var mindre än KBS-3-kapslarna och rymde en tredjedel så mycket använt kärnbränsle. Detta innebar att det skulle krävas cirka 18 000 kapslar för att kapsla in det använda kärnbränsle som uppstår i referensscenariet för reaktordrift (50 års drift för kraftverken i Forsmark och Ringhals samt 60 års drift för Oskarshamnsverket (SKB 2007b)). Antalet deponeringshål i Pass-konceptet blev således 60 för detta scenario.

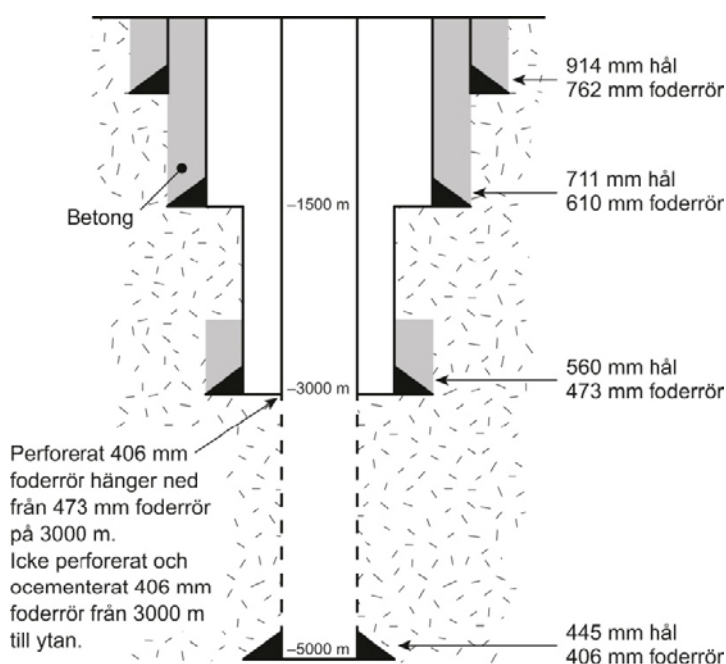


Figur 2-7. Principutformning av ett deponeringshål såsom det utformades i Pass-studien (SKB 1992).

En svag punkt i det koncept som togs fram i Pass-studien var att borrhål av 80 cm vida borrhål då låg klart bortom borrhålsindustrins erfarenheter. I nyare studier (Beswick 2008, Odén 2013) har en samsyn utvecklats att det borde vara möjligt att med så kallad styrd borrhål borra raka och vertikala hål med en diameter som understiger 0,5 meter ner till 5 kilometers djup. Beswick et al. (2014) menar att en optimal utformning vore att ha en innerdiameter på foderrören av 44,5 centimeter vilket skulle kräva borrhål på drygt 60 centimeters diameter, något som författarna påpekar ligger bortom borrhålsindustrins nuvarande erfarenheter. I kölvattnet efter nedläggningen av Yucca Mountain programmet i USA har Sandia National Laboratories, SNL, tagit fram ett koncept som bygger på deponering på mellan 3 och 5 kilometers djup i borrhål som är drygt 40 cm vida (Brady et al. 2009, Arnold et al. 2011). SKB har inom sitt åtagande att följa utvecklingen vad beträffar deponering i djupa borrhål beslutat att basera sina jämförelser med KBS-3-metoden i denna rapport på det koncept som utvecklats av SNL.

I referensutformningen av det koncept som utformats av SNL (Arnold et al. 2011) anges att borrhålsdiametern ska vara drygt 43 cm (17") och att bränsleelementen konsolideras före inkapsling (bränsleelementen demonteras och de lösa bränslestavarna kapslas in). I det svenska systemet skulle bränslekonsolideringen omfatta demontering av drygt 30 000 bränsleelement och hantering av omkring 4 miljoner bränslestavar. SKB bedömer att det finns en risk för att bränslekonsolidering leder till sådan strålningsexponering av personal och risk för olyckshändelser att den inte kan anses motiverad. Håldiametern i den av SNL föreslagna referensutformningen skulle då leda till att endast ett bränsleelement kan rymmas i varje kapsel. SKB har därför beslutat basera arbetet på den borrhålsdiameter som föreslås av Brady et al. (2009) som är 44,5 cm (17½"). Detta leder till den principutformning av ett borrhål som redovisas i figur 2-8 (Odén 2013). Volymen av ett deponeringshål är cirka 1 300 m³ vilket med de 80 hål som skulle krävas för det svenska programmet ger drygt 200 000 m³ borrhåkax i löst mått. Borrhåkaxet förväntas vara i huvudsak siltigt med inslag av skärvor vilket gör att det sannolikt är svårt att finna avsättning för det.

För att säkerställa att kapselsträngen kan sänkas ner genom ett rakt hål med minimal risk för att fastna anläggs hålen med så kallad styrd vertikalborrning. Hålet kläs in med foderrör med samma innerdiameter hela vägen till hålets botten. Det inre genomgående foderröret är perforerat i deponeringszonen. Anledningen till perforeringen är dels att man vill undvika stora tryckdifferenser mellan rörets in- och utsida och dels att den bentonitbaserade deponeringsmud som förs ner i hålet innan en kapselsträng sänks ner ska kunna tränga ut i mellanrummet mellan foderröret och berget.



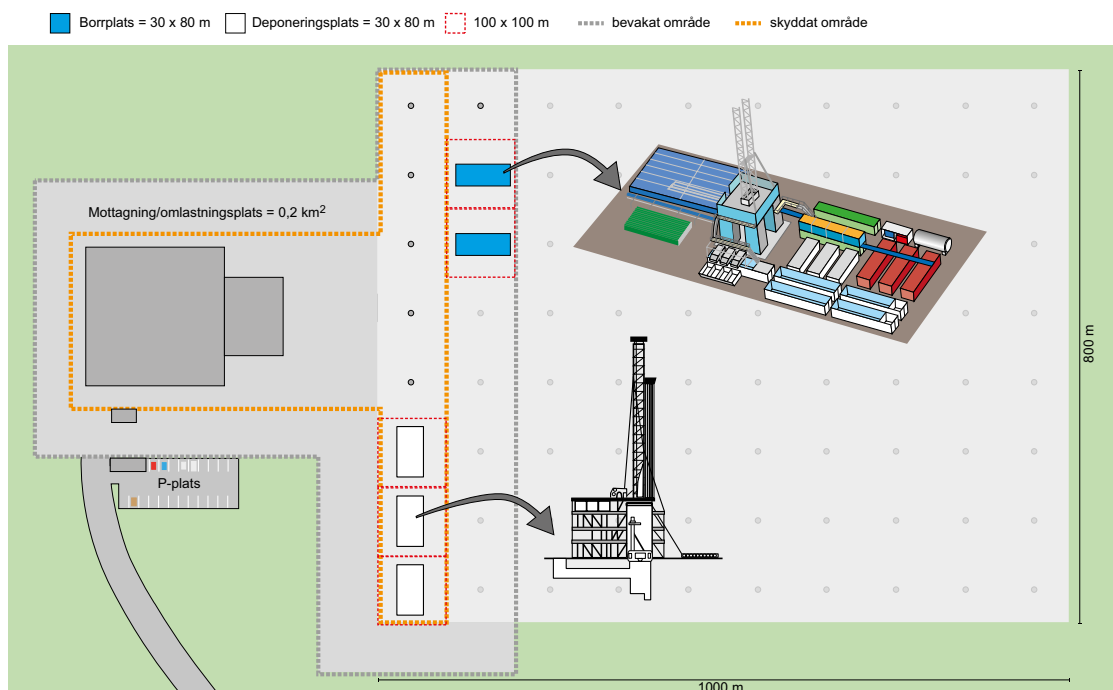
Figur 2-8. Konceptuell utformning av ett borrhål för deponering av använt kärnbränsle (inte skalenlig). Angivna foderrörsdimensioner avser ytterdiameter (Odén 2013).

I tabell 2-1 redovisas dimensioner för foderrör och kapslar. Kapslar med de i tabellen angivna dimensionerna rymmer ett PWR-element alternativt två BWR-element. Genom hopkoppling av kapslarna till strängar med 40 kapslar kan ett deponeringshål fås att rymma 400 kapslar. En sådan kapselsträng är cirka 200 meter lång och väger cirka 60 ton. Den totala mängd använt bränsle som förväntas uppstå i SKB:s referensscenario med avslutad drift i reaktorerna B1 och B2, 50 års drift av reaktorerna R1, R2 och O1 samt 60 års drift i övriga reaktorer (SKB 2013b) ger upphov till cirka 32 000 kapslar vilket skulle kräva cirka 80 borrhål. Beräkningar av termiskt driven grundvattenströmning (Marsic och Grundfelt 2013a) visar att borrhålen bör förläggas med cirka 100 meters inbördes avstånd.

En möjlig principutformning av en sådan anläggning med 80 borrhål visas i figur 2-9. Då ett slutförvar för använt kärnbränsle är en kärnteknisk anläggning av kategori 2³ ska kärnämne och kärnavfall hanteras, bearbetas, lagras eller slutförvaras inom skyddat område. Detta innebär att hela det område där deponering pågår eller har pågått samt byggnader för mottagning och hantering ska ingå i skyddat område. Möjligen kan anläggande av nya hål (borrning, loggning och installation av foderrör) ske utanför skyddat område men inom bevakat område. I principskissen har detta markerats genom att en korridor lämnats för att anläggningsområdet inom bevakat område ska nås utan att passera skyddat område.

Tabell 2-1. Nyckeldimensioner för en anläggning för deponering av använt kärnbränsle i djupa borrhål.

Parameter	Värde
Borrhålsdiameter i deponeringszonen	445 mm
Foderrörens dimensioner i deponeringszonen	OD=406 mm, ID=381 mm
Kapselns ytterdiameter	340 mm
Kapselns innerdiameter	318 mm
Kapselkopplingarnas ytterdiameter	360 mm
Kapselns kapacitet, antal bränsleelement	1 PWR eller 2 BWR



Figur 2-9. Möjlig principutformning av en anläggning för deponering av använt kärnbränsle i djupa borrhål. Notera att anläggningslayout och övrig utformning endast utgör förenklade illustrationer.

³ SSMFS 2008:12.

2.2.2 Uppförande

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 diametrar upp till 0,445 meter medan hål med större diametrar ligger utanför vad som i dag kan åstadkommas (Beswick 2008, Odén 2013). Det bör dock noteras att det inte finns någon praktisk erfarenhet av att borra hål med uppemot en halvmeters diameter i kristallint berg.

Hålets stabilitet är en viktig faktor för att man framgångsrikt ska kunna slutföra borrning och installation av foderrör. Odén (2013) redovisar en analys av viktiga faktorer som påverkar borrhålsstabiliteten såsom:

- Hålets dimension och infodring.
- Bergmassans mekaniska egenskaper.
- Spänningstillståndet i bergmassan.
- Omgivande grundvattentryck.
- Borrningsmetod och borrningsprocedur.
- Bergmassans temperatur.

Hålets dimension och infodring kan betraktas som givna av den anläggningsutförning som redovisas i avsnitt 2.2.1. Resonemanget nedan baseras på borrhål med diametern 0.445 meter och djupet 5 kilometer.

I en sprickfattig bergmassa med en statisk vätskepelare i borrhålet bedöms spjälkbrott kunna ske vid djup som överstiger 1,5 kilometer med bergutfall som följd. Vid lägre vätsketryck kan spjälkbrott uppträda högre upp i hålet. Dessa uppkommer främst i samband med borrningen varefter hålväggen stabiliseras genom den omlagring av spänningarna som brottet leder till. På större djup än 4 kilometer bedöms kombinationer av spjälk- och skjuvbrott kunna uppträda.

I borrhålssektioner med kraftigt uppsprucken bergmassa kan strukturrelaterade bergutfall uppkomma på alla djup så länge hålet är ofodrat. Spänningsrelaterade skjuvbrott bedöms kunna uppstå på djup som överstiger cirka 1 kilometer. Håldeformationer kan förväntas ge problem vid borrningen i uppspruckna partier. Dessutom kan krypdeformationer och skjuvbrott skada infodringen i sådana bergpartier. Deformerad infodring kan i sin tur leda till problem vid deponering och eventuella återtag av kapslar med använt bränsle.

Odén (2013) redovisar en bred genomgång av för- och nackdelar med olika borrhästekniker, se tabell 2-2. Slutsatsen av analysen är att huvudalternativet är konventionell rotationsborrning. Rotationsborrning med motorn vid kronan kan bli aktuellt om man ska använda diamantkronor eller vid styrd borrning. Rotationsborrning med omvänd spolning kan bli aktuellt i den övre delen av hålet där diametern är mycket stor.

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). 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. Foderrörssektioner 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.

Tabell 2-2. För och nackdelar med olika borrhstekniker (Odén 2013).

Teknik	Fördelar	Nackdelar
Hammarborrning med luft	Hög borrsjunkning. God vertikalitet (låg vikt på kronan). Lämplig för stor diameter. Lämplig där det är svårt att behålla borrhvatskan.	Begränsat borrhdjup pga. tillgänglig luftvolym/tryck. Stabilitetsproblem pga. underbalansering Hög energiförbrukning vid större djup.
Hammarborrning med borrhvatska/vatten	Hög borrsjunkning. God vertikalitet (låg vikt på kronan).	Diameterbegränsning (endast tillg. i mindre storlekar). Problem i områden med borrhvatskeförluster. Hammarproblem (igensättning) med partiklar i borrhvatskan.
Kärnborrning med wire-line	Dokumentation (kärnor) från hela borrlängden. Hyfsad borrsjunkning.	Diameterbegränsning (endast tillg. i mindre storlekar). Problem i områden med borrhvatskeförluster. Svårt att behålla vertikalitet i förstorade hål (låg böjhållfasthet vid liten diameter).
Konventionell rotationsborrning (direktspolning)	Hyfsad borrsjunkning i kristallint berg. Lämplig för stor diameter. Hyfsad vertikalitet (böjstyv borrhvatssträng).	Mycket höga cirkulationsflöden i stora borrhål (kaxtransport). Mycket hög energiförbrukning. Problem i områden med borrhvatskeförluster.
Rotationsborrning med motor vid borrhvatskronan (direktspolning)	Hyfsad borrsjunkning i kristallint berg. Lämpad för stor diameter. Minskad förslitning av borrhvatssträngen pga. liten rotation.	Mycket höga cirkulationsflöden i stora borrhål (kaxtransport). Mycket hög energiförbrukning. Problem i områden med borrhvatskeförluster.
Rotationsborrning med omvänd spolning (mha. tryckluft)	Hyfsad borrsjunkning i kristallint berg. Lämpad för stor och mycket stor diameter. Endast låg pumpkapacitet pga. upptransport genom borrhvatssträngen. Låg energiförbrukning. Endast mindre problem i områden med borrhvatskeförluster.	Reducerad borrsjunkning i förh. till direktspolning pga. avsaknad av spoltryck mot berget. Ingen motor vid kronan möjlig vid omvänd spolning (roterande borrhvatssträng).

Temperaturen i bergmassan på 5 kilometers djup beräknas ligga i intervallet 80–100 °C. Denna temperatur förväntas inte leda till några särskilda borrhstekniska problem.

Nedan diskuteras erfarenheterna från två borrhål, det så kallade KTB-hålet i Tyskland (Kontinentales Tiefbohrungsprogramm der Bundesrepublik Deutschlands) ner till drygt 9 kilometers djup och borrhvatsningarna i Siljansringen inom Djupgasprojektet ner till knappt 7 kilometer, som betraktas som de hål som ligger närmast vad som skulle behövas för deponering i djupa borrhål.

I figur 2-10 visas den 83 meter höga borrhvatsningen som användes för borring av KTB-hålet. KTB-hålet hade en diameter av cirka 0,45 meter (samma som antagen diameter för ett deponeringshål) ner till tre kilometers djup. Mellan tre och sex kilometers djup var diametern 0,375 meter medan hålet under denna nivå hade mindre diameter. Ner till cirka 7 kilometers djup användes så kallad styrd borring. Erfarenheterna från detta hål är att visar att det är möjligt att borra rakt och vertikalt ner till 5 kilometers djup men att de ökande bergspänningarna gav stora stabilitetsproblem på större djup. Speciellt uppstod stora avvikelser från vertikalitet när man vid större djup än 7 kilometer övergav den styrda borrhvatsningen.



Figur 2-10. Borrrigg – UTB-1 GH 300 EG som användes i det kontinental djupborrningsprogrammet i Tyskland (Harrison 2000).

En kaliperloggning av hålgeometrin visar en relativt stor avvikelse från det teoretiskt runda hålet, särskilt under 5 kilometers djup. Den minsta diametern överensstämmer ungefär med borrkronans diameter medan den största diametern är större. Det kan noteras att anisotropin i bergspänningar var signifikant med ungefär en faktor 2 mellan den största och den minsta horisontella spänningen.

Gravberg-1 hade smalare dimensioner än KTB-hålet. Ner till 1 250 meter användes en krona med 0,455 meters diameter. Från den punkten och ner till drygt 4 kilometers djup var diametern 0,311 meter för att därunder minska till 0,216 meter ner till drygt sex kilometers djup. När detta djup hade nåtts gick borrhållningen av och man misslyckades med att fiska upp den nedre delen. Därefter gjordes sammanlagt tre omborringar först med diametern 0,216 meter och därefter med diametern 0,165 meter.

Gravberghålet är under 1 500 meters djup mer eller mindre elliptiskt. De relativt måttliga horisontella bergspänningarna är anisotropa och bergets hållfasthet är relativt låg. Riktningen hos den långa sidan av hålet sammanfaller med den minsta horisontella huvudspänningens riktning och är längs långa sträckor 60–70 % längre än den korta sidan som överensstämmer med borrkronans diameter. Där hålet skärs av sprickzoner är spänningsanisotropin mindre och som en konsekvens hålformen närmare cirkulär. Orsaken till hålets ellipticitet har bedömts vara spjälkningbrott i det intakta berget (Odén 2013).

Några särskilt viktiga slutsatser avseende borrhållningen 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 borrhållning och deponering.
- Kunskap om de bergmekaniska förhållandena är central för att bedöma möjligheterna att utföra borrhållningen enligt de krav som kommer att ställas. I första hand kan bergmekaniska fenomen skapa problem i samband med borrhållningen genom att utfall, och stora deformationer kan orsaka fastborring, 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 svår bemästrade problem att skapa vertikala och raka borrhållningar. 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 borrhållning krävs för att minska antalet borrhållningar som inte kan godkännas.
- Erfarenheterna visar att man inte bör borra djupare än fem kilometer, om man ska uppnå ett relativt rakt borrhållning.

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 så kort som möjligt, för att härigenom minska risktagande och kostnader.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att det bör vara möjligt att framställa tillräckligt vida och djupa deponeringshål med dagens teknik även om sådana hål ännu inte har borrats. På grund av det stora djupet är detaljkaraktiseringen av berget komplicerad och dyr. Man måste därför räkna med att mätningar i pilothål på deponeringshålens 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 borrningen 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 förläggingsplatsen inte kan tas i anspråk, eftersom sådana zoner sannolikt sträcker sig genom flera borrhållägen.

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). Detta skulle reducera såväl arealbehovet ovan mark som den totala mängden borrhål 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 borrhållägen. Likaså ökar svårigheterna med ökande håldiameter på grund av att borrhållägen blir allt för styva. Grenade hål med diametern 6½ eller 8½ tum kan utföras i granit, men inte med hål som är grövre än 12¼ tum (311 millimeter). Grenhålen borrar genom foderrörsväggen. Hålet i foderröret blir i sedimentära bergarter typiskt cirka 50 meter långt och kristallina bergarter 100 meter.

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 stamhållens.
- 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.

2.2.3 Deponering

Denna beskrivning av förfarandet vid deponering i djupa borrhål utgår från den beskrivning som ges av Arnold et al. (2011) och som sammanfattats av Odén (2013). Grundtanken är att varje deponeringshål ska rymma 10 kapselsträngar som var och en består av 40 ihopkopplade kapslar. Kapselsträngarna separeras av lastbärande betongpluggar som avlastar underliggande kapselsträngar.

Stålkapslar med två BWR-element alternativt ett PWR-element anländer till anläggningens mottagningsbyggnad i särskilda transportbehållare lastade på ett väg- eller rälsfordon och ställs upp i ett mellanlager. De kapslar som har föreslagits av Arnold et al. (2011) har en godstjocklek på endast 11 millimeter, se tabell 2-1. Detta innebär att strålningsnivån från kapslarna kommer att vara så pass hög att kapslarna i mottagningsbyggnaden måste lagras och hanteras fjärrstyrt i strålningsskärmade utrymme. Möjligen bör mellanlagringen ske i de transportbehållare som de anländer i vilket i så fall innebär att systemet måste innehålla ett relativt stort antal transportbehållare.

Från mellanlagret förs kapslarna över till en deponeringsbehållare som är monterad på ett deponeringsfordon och körs till det aktuella deponeringshålet. Det föreslagna deponeringsförfarandet (Arnold et al. 2011) innebär att strängar av 40 ihopkopplade kapslar sänks ner till sin position i deponeringshålet med hjälp av en deponeringsrigg. I figur 2-9 illustreras deponeringsriggen med en rigg som föreslagits av det amerikanska konsultföretaget Woodward-Clyde Consultants (1983) som refereras av bland annat Arnold et al. (2011). Denna utrustning är sannolikt inte optimal för ändamålet. I princip kan dock deponeringen ske med den rigg som används för borrning av depo-

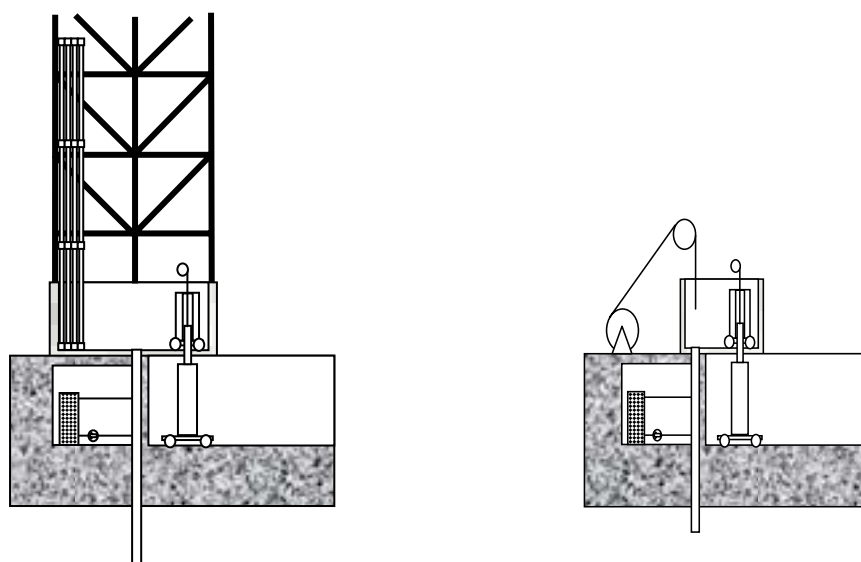
neringshålen. Denna måste då kompletteras med möjligheter till fjärrstyrd hantering av kapslarna i strålskärmad utrymme i utrymmet ovanför deponeringshålet. Möjligheter finns även att utveckla alternativ teknik där deponeringen sköts med vajer spel alternativt så kallad coiled tubing. I figur 2-11 illustreras principerna för deponeringen med rigg respektive med coiled tubing.

Innan deponeringen av en kapselsträng fylls den del av deponeringshålet där kapseln ska placeras med deponeringsmud. Denna mud är tänkt att tjäna som buffert och ge en viss smörjeffekt under deponeringen. Muddens sammansättning är inte fastställd i detta skede. Arnold et al. (2011) föreslår en mud som består av bentonit och syntetisk olja. Innehållet av bentonit i en sådan mud måste anpassas så att det går att föra ner kapslarna genom mudden. Den får således inte vara alltför fast samtidigt som dess funktion som buffert och fyllning i deponeringszonen blir bättre vid högre bentonitnehåll. Oavsett muddens sammansättning kommer buffertlagrets tjocklek mellan kapseln och hålväggen att endast vara i storleksordningen 5 centimeter.

Innan deponeringen görs även en hålinspektion för att säkerställa att hålet är rakt samt att foderröret är helt och utan förträngningar.

Vid deponeringen körs deponeringsfordonet fram och deponeringsbehållaren reses till vertikal position över hålet. Ett lock eller en sluss i deponeringsbehållarens övre ände öppnas och ett deponeringsverktyg (monterat på t.ex. en borrarsträng) ansluts till kapseln i behållaren. Därefter öppnas den nedre änden av behållaren och kapseln sänks ner till deponeringshålets mynning där den ansluts med en koppling till den föregående kapseln. Strängen av kapslar sänks ner till en position där den kan låsas hängande i hålet med ett gripverktyg. När 40 kapslar har kopplats ihop på detta sätt sänks hela strängen ned till sin slutposition i deponeringszonen mellan 3 och 5 kilometers djup. Den understa kapseln utrustas med en kalipersond för att säkerställa fri passage för kapslarna på deras väg genom hålet.

När en kapselsträng är på plats frigörs deponeringsverktyget och dras ur hålet och en bridgeplugg monteras ovanför den översta kapseln och deponeringsmudden spolats ur den del av hålet som ligger ovanför pluggen. Därefter gjuts en 10 meter lång betongplugg ovanpå bridgepluggen och betongen får härda. Betongpluggen tjänar sedan som golv för nästa kapselsträng.



Figur 2-11. Skiss av anläggning för deponering med borrarigg (vänster) respektive med wire eller coiled tubing (höger).

Ovanför den sista strängen sätts en bridgeplugg och gjuts en 100 meter lång betongplugg. När betongpluggen har härdats kapas det inre foderröret (406 mm i figur 2-8) ovanför betongpluggen och dras ur hålet. Därefter gjuts en betongplugg upp till överkanten av den cementerade delen av 473 millimeters foderröret. När denna plugg har härdats kapas även 473 millimetersröret ovanför betongpluggen och dras ur hålet varvid borrhålssektionen mellan cirka 2900 och 1500 meters djup lämnas ofodrad. Hålet förseglas därefter genom växelvis applicering av betongpluggar, bentonitproppar, sandfilter och asfaltspluggar (Arnold et al. 2011, 2013).

Som ett alternativt material för återfyllnad av deponeringszonen har små granuler, hagel, av en blylegering föreslagits (Gibb et al. 2008, Arnold et al. 2011, Beswick et al. 2014). I förslaget anges att denna legering bringas att smälta genom den värme, resteffekt, som det deponerade bränslet avger. Smältpunkten anges till 185 °C. Det kan noteras att denna temperatur ligger långt över den i SKB:s arbete beräknade maximala temperaturen som kommer att uppstå i borrhålet (Marsic et al. 2006, Marsic och Grundfelt 2013a).

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 kapselsträng med 40 kapslar väger i storleksordningen 60 ton. Vid deponering med borrhägen kommer dock borrhägens egenvikt att vara avsevärd. Den avlastning som fås på lyftmaskineriet är således relativt liten i förhållande till borrhägens egenvikt. Om man kör ner kapseln för långt finns det en risk att en stor del av borrhägens egenvikt kommer att belasta kapseln, med följd att skador uppstår på denna.

Lägesbestämningen kompliceras ytterligare av att borrhägen 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 borrhägen 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 cirka 250 °C som rådde i botten på KTB-hålet. Detta innebär att den nödvändiga temperaturkorrigeringen i ett svenskt borrhål med djupet 5 000 meter kan förväntas vara betydligt mindre än det som uppstod i KTB-hålet, men ändå tillräckligt betydande för att behöva hanteras.

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 borrhägen, 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.

Antalet kapslar för deponering skulle bli cirka 32 000 med den ovan beskrivna hål- och kapselutformningen. För att drifttiden ska bli ungefär densamma som projekterats för KBS-3-metoden, det vill säga omkring 40 år, krävs då anläggningen klarar deponering av 800 kapslar per år eller cirka fyra kapslar per arbetsdag. I tabell 2-3 redovisas uppskattade tider för genomförande av de huvudsakliga arbetsmomenten vid borrhägen av deponeringshål respektive vid deponering och förslutning. För att nå en genomsnittlig deponeringstakt av 800 kapslar per år behöver deponering och förslutning pågå parallellt vid tre hål. För att säkerställa att det finns hål tillgängliga för att upprätthålla denna deponeringstakt behöver anläggande av 1,5 hål samtidigt pågå samtidigt. Denna bedömning baseras på att ett pilothål borras för vart fjärde deponeringshål. Med hänsyn till eventuell hålkassation liksom att krav kan uppkomma på tätare pilothålsloggning bör anläggande av två hål pågå parallellt. Detta har illustrerats i figur 2-9.

Tabell 2-3. Ungefärlig tidsåtgång för olika moment vid borrning av deponeringshål respektive deponering och förslutning.

Moment	Tidsåtgång/hål
Borrning av pilothål med loggning och geovetenskaplig utvärdering	3 månader
Etablering och avetablering av borrhög	2 månader
Borrning och montering av foderrör	4 månader
Anläggande av deponeringshål	9 månader
Etablering och avetablering av deponeringsutrustning	1 månad
Loggning av hålets kondition	16 timmar
Ihoppkoppling av kapslar (2 kapslar per dag och hål)	10 månader
Nedtransport av kapslar (borrsträngen tur och retur och 10 strängar/hål)	160 timmar
Förslutning av hål	6 månader
Deponering och förslutning av hål	~18 månader

2.2.4 Förslutning

Efter slutförd deponering ska deponeringshålen 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. Arnold et al. (2011) föreslår en förslutning som är indelad i en undre och en övre zon. Den undre zonen motsvarar den borrhålssektion mellan 1 500 och cirka 2 900 meters djup där foderrören avlägsnats efter deponering medan den övre zonen utgörs av de övre 1 500 metrarna av hålet som även efter deponering är infodrat med cementerade foderrör. Utformningen av borrhålsförslutningen utgår från funktionskrav på permeabilitet, tätning mot borrhålsväggen i den undre zonen, materialets långtidsbeständighet samt förslutningens mekaniska styrka och kemiska stabilitet i aktuell miljö. Vidare specificeras att en del av de använda materialen bör kunna förses med agenser som retarderar icke-sorberande nuklider som ¹²⁹I samt att förslutningen av redundansskäl ska bestå av flera pluggar och pluggmaterial.

I den undre zonen föreslås att en plugg av bentonit eller en bentonit-sandblandning installeras mellan två cement- eller betongpluggar som fungerar som mothåll mot bentoniten. För att reducera den kemiska växelverkan mellan betong och bentonit föreslås mellanliggande sand- eller bergkrosslager. Förslutningen av den övre zonen föreslås vara cementbaserad. Som alternativ har det föreslagits smältning och omkristallisation av en grus- eller sandfylld borrhålssektion tillsammans med det omgivande berget, ”bergsvetsning” (eng. rock welding) (Arnold et al. 2012, Beswick et al. 2014). Den uppvärmning som skulle krävas för att smälta berget skulle då tillföras genom eluppvärmning. I ett förslag till forsknings-, utvecklings- och demonstrationsprogram (Arnold et al. 2013) föreslås insatser både för att testa bentonit- och cementmaterialens egenskaper och för att utveckla bergsvetsningsmetoden.

2.3 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.

Teknik för uppförande av en anläggning för deponering i djupa borrhål med de för ändamålet önskade egenskaperna finns i princip. Det bedöms som möjligt att åstadkomma fem kilometer djupa deponeringshål med en maximal diameter på 0,445 meter även om detta ännu inte har demonstrerats i praktiken.

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 3–5 kilometers djup har föreslagits men måste utvecklas till industriell tillämpning. Det får betraktas som uteslutet att man skulle kunna garantera tätheten hos en deponerad kapsel eller precisera de hydrologiska och geokemiska förhållandena i deponeringszonens närhet. Dessa barriärer kommer därför inte att kunna tillskrivas någon inneslutande eller fördröjande funktion efter anläggningens förslutning.

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 bland annat i Äspölaboratoriet.

Djupa borrhål måste förslutas från markytan. Ett program för utveckling av teknik för detta har föreslagits av Sandia National Laboratories i USA. Även vid förslutningen är kvalitetskontroll från ytan svår. Detta identifieras även i programförslaget.

3 Förutsättningar för val av förläggingsplats

I detta kapitel beskrivs vilka krav som behöver ställas på förläggingsplatsen 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 förläggingsplats 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 Förläggingsplats för KBS-3-förvar

3.1.1 Bergets funktion

Ett KBS-3-förvar ska placeras i en långsiktigt stabil geologisk miljö av litet ekonomiskt intresse. Härigenom isoleras avfallet från människor och den yttre miljön samt minskas risken för mänskligt intrång. 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. Säkerhetsfunktionerna delas 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 förläggingsplatsen 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 (SKB 2011). 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 och kriterier (SKB 2011):

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

- Vara reducerande; frånvaro av löst syre liksom närvaro av snabbreagerande reducerande ämnen såsom tvåvärt järn och sulfid är goda indikatorer på reducerande miljö.
- Ha en jonstyrka som är tillräckligt hög för att undvika frigörelse av kolloider från bentonitbufferten och som underskrider de koncentrationer som inverkar negativt på bufferten och återfyllningen i tunnarna; katjonkoncentrationen bör överstiga 4 mM vilket innebär att marginalen är stor mellan de salthalter som kan skada bufferten till dem som påträffas på det planerade förvarsdjupet på cirka 500 meter. De koncentrationer som kan skada återfyllningen anges till motsvarande $>0,6$ M (35 g/l) NaCl. För bufferten anges motsvarande värde till $>1,7$ M (100 g/l) NaCl.
- Ha en låg koncentration av naturliga kolloider för att undvika kolloidtransport av radionuklider; naturliga kolloider destabiliseras när jonstyrkan i grundvattnet ökar. Det ovan givna kriteriet >4 mM är tillräckligt för att hålla kolloidkoncentrationen i grundvattnet låg.
- Ha låga halter av ämnen som kan skada kapsel och buffert. För bufferten är det främst ämnen som kalium, sulfid och järn som kan vara skadliga. Inga absoluta gränser går dock att ange. För kapseln är det främst sulfid som avses. Sulfid kan även bildas genom bakteriell reduktion av sulfat vilket kräver tillgång på näringsämnen som löst vätgas, metan och organiskt kol.
- Ha ett pH-värde som understiger 11 för att inte bufferten ska ta skada.

För att ge *gynnsamma transport- och grundvattenförhållanden* bör berget bland annat ha ett högt flödesrelaterat transportmotstånd (F-faktor) längs de flödesvägar som leder till och från slutförvaret samt ett högt masstransportmotstånd från bufferten till det rörliga grundvattnet (låg ekvivalent flödes hastighet). Det är inte möjligt att ange några absoluta gränser för dessa egenskaper hos berget utan de måste utvärderas i en integrerad analys.

För att ge *stabila mekaniska förhållanden* för kapseln har kriterier för skjuvrörelser i sådana sprickor som korsar ett deponeringshål tagits fram i samband med analysen av kapselkonstruktionen. De resulterande kriterierna är att förskjutningen skall underskrida 5 cm och skjuvhastigheten ska underskrida 1 m/s.

För att ge *termiskt gynnsamma förhållanden* behöver temperaturen i berget överstiga buffertens fryspunkt, det vill säga $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Den analys av de mekaniska konsekvenserna av skjuvrörelser som ligger bakom ovan angivna kriterier för stabila mekaniska förhållanden är utförd för materialegenskaper som gäller ner till $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Om således temperaturen måste antas falla under denna temperatur bör detta tas med i konsekvensanalysen av sådana skjuvrörelser.

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 möjliga att överblicka. De undersökningar som SKB har 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.

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.

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 samt 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 inför lokaliseringen av ett slutförvar, Östhammar och Oskarshamn, har också deltagit aktivt i planeringsarbetet.

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 i Östhammars kommun och Simpevarp/Laxemar i Oskarshamns kommun. 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. Det kommer att gå att karakterisera berget vid varje deponeringshål mycket väl. Därmed kommer varje kapsel att omges av berg med väl kända egenskaper och positioner som inte uppfyller specifikationerna kommer att kunna undvikas.

Våren 2011 lämnade SKB in ansökningar till Mark- och miljödomstolen och Strålsäkerhetsmyndigheten om tillstånd enligt Miljöbalken respektive Kärntekniklagen att få uppföra ett slutförvar enligt KBS-3-metoden vid Forsmark i Östhammars kommun och en anläggning för inkapsling av bränslet i anslutning till Clab i Oskarshamns kommun.

3.2 Förläggningsplats för djupa borrhål

3.2.1 Bergets funktion

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, främst beroende på att ett högt saltinnehåll ger en densitetsskiktning av grundvattnet men även på grund av låg genomsläpplighet (permeabilitet) för grundvattnet. 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.

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, förläggningsdjup och deponeringsförfarande kommer de gynnsamma förhållandena dock inte att vara identiska. Nedan beskrivs de viktigaste kraven på berget vid slutförvaring i djupa borrhål.

Berget bör vara fritt från vattenförande sprickzoner som kan skapa transportvägar till ovanförliggande berg om de stagnanta grundvattenförhållandena skulle ändras. Detta skulle kunna ske genom att slutförvaret introducerar nya drivande krafter för grundvattnet (t.ex. förändrad vattenkemi, termisk konvektion, eller gasutveckling på grund av korroderande stål). 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):

- Ett tillräckligt stort 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. Tsang och Niemi (2013) redovisar baserat på en workshop vid Uppsala universitet (Tsang et al. 2012) att hydrogeologin i de djupare (under 1 km djup) delarna av berget fortfarande är ett öppet forskningsområde och listar ett antal frågeställningar relaterade till bergets permeabilitetsstruktur, drivande krafter för grundvattenrörelser, kopplade processer (bergmekanik – flöde, grundvattenkemi – flöde, seismik – flöde) som behöver klarläggas för att man ska förstå den djupa hydrogeologin. Författarna påpekar vidare flera svårigheter att applicera dagens undersökningsmetoder för att försöka klarlägga de listade frågeställningarna. En slutsats i artikeln är att även undersökningsmetoderna är ett öppet forskningsfält när det gäller det djupa grundvattensystemet.

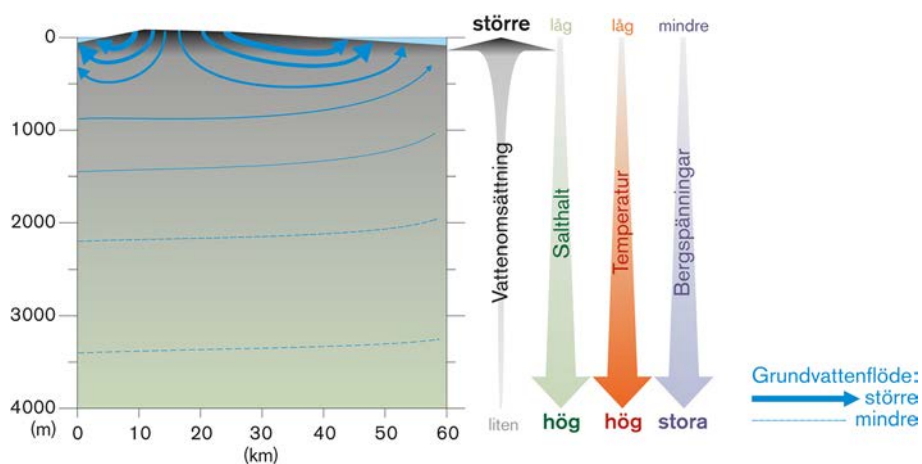
3.2.2 Förutsättningar för att uppfylla bergets funktion

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, Marsic och Grundfelt 2013b) 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:

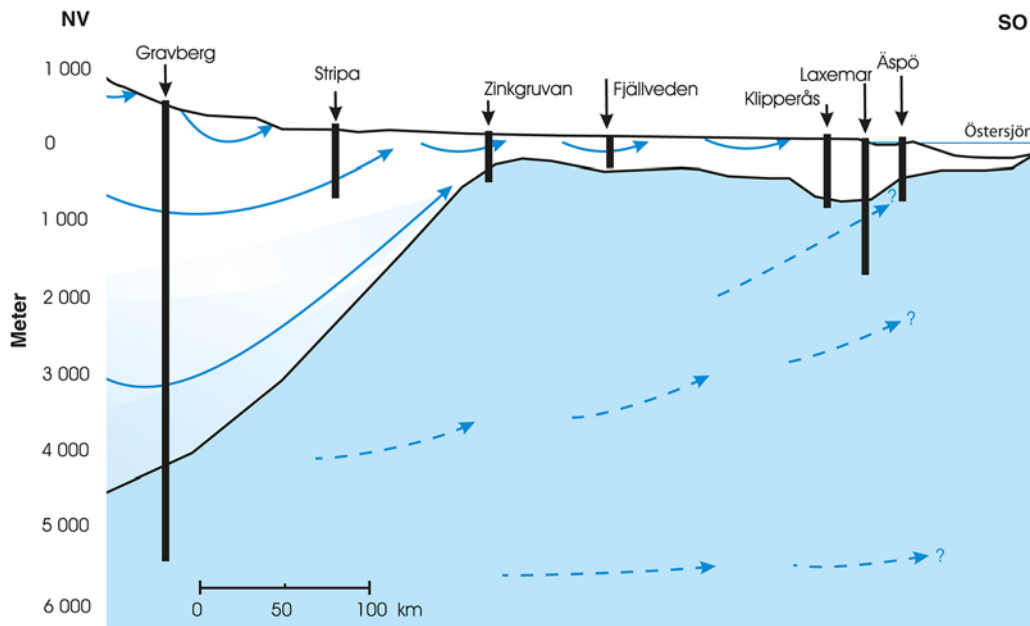
- Kolahalvön – Djupborrhålet SG-3 (12 262 meter).
- Ukraina – Krivoy Rog (5 000 meter).
- Tyskland – Tyska kontinentala djupborrprogrammet KTB (pilothål 4 000 meter och huvudhål 9 101 meter).
- Sverige – Provboringar för djupgas vid Gravberg (6 957 meter) och Stenberg (7 000 meter) i Dalarna.
- SKB:s Fud-program, borrhål KLX02 i Laxemar (1 700 meter).
- Finland – Outokumpu deep drilling project (2 516 meter).

Det kan noteras att av dessa hål är endast hålet på Kolahalvön (SG-3), hålen i djupgasprojektet i Dalarna, Laxemarhålet (KLX02) och hålet i Outokumpu belägna inom den fennoskandiska urbergsskölden. Ett svenskt vetenskapligt program för djup borrning, Swedish Deep Drilling Programme (SDDP) initierades 2007. Vetenskapsrådet beviljade 2009 anslag för införskaffandet av en borrhög med kapacitet att borra ner till 2,5 km. Riggen levererades 2012 och ett första borrhål har påbörjats med syftet att studera processer i samband med bergskedjebildningar. Inga resultat som kan bidra till att öka kunskapsbasen för deponering i djupa borrhål föreligger dock 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. Modellen visar att det djupa grundvattnet har en högre salthalt än mer yt nära grundvatten. I områden med flack topografi förefaller gränsen mellan söt- och saltvatten ligga på ungefär 1 000 meters djup medan sötvattnet förefaller tränga djupare i områden med mer utpräglad topografisk relief. Som indikeras i figuren finns det även indikationer på att salthalten förändras mer successivt i en övergångszon och att det inom saltvattenområdet förekommer stråk av sötare vatten (SKB 2008, Ahonen et al. 2011).



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. Mörkare blå färg indikerar högre salthalt. 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 då till 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 förlägningsplats. I rapporten 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.

Tsang och Niemi (2013) konstaterar också att förhållandena på stora djup gör mätningar osäkra och tidskrävande. Författarna konstaterar bland annat att de höga bergspänningarna på stora djup sannolikt skapar stora skador på berget runt ett borrhål som man måste ta hänsyn till vid utvärderingen av mätdata. De höga spänningarna innebär även att bergprover som tas upp till ytan kommer att vara avlastade från dessa spänningar och därmed begränsat representativa för förhållandena in situ. Även användningen av borrhålen vid borrhålen kommer att påverka förhållandena och försvåra tolkningen av mätningar. Författarna drar slutsatsen att det kan ta månader eller till och med år att återställa förhållandena från den störning som borrhålen i sig åstadkommer.

Det stora djup som skulle vara aktuellt vid deponering i djupa borrhål innebär att platskarakteriseringen 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 förlägningsplatsen. Sannolikt kommer sådana undersökningar av praktiska och ekonomiska skäl att ske i ett pilothål med mindre diameter än deponeringshålet.

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. 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 måste dessutom kunna visa att grundvattensituationen förblir stagnant även efter påverkan från till exempel nedisningar och jordbävningar eller från drivkrafter som introduceras av själva förvaret. 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

I ett KBS-3-förvar är berggrundens funktion att ge ett gott skydd för närzonsbarriärerna genom gynnsamma kemiska, hydrogeologiska, mekaniska och termiska förhållanden samt att bidra till fördröjning av eventuellt frigjord radioaktivitet genom att ge goda nuklidtransportförhållanden. Under mer än 30 års forskning har SKB visat att sådana förhållanden råder på 400–700 meters djup på ett stort antal platser. Den undersökningsteknik som har utvecklats inom forskningsprogrammet medger noggranna undersökningar från markytan till överblickbara kostnader. När ett slutförvar sedan byggs kommer man att kunna komplettera dessa resultat med detaljerade undersökningar från undermarksdelen.

Vid deponering i djupa borrhål utgör fördröjningen i berget slutförvarets huvudsakliga skyddsfunktion som upprätthålls genom en densitetsskiktning på grund av förekomsten av salt grundvatten på stora djup och låg genomsläpplighet. De allmänna kraven på berget på förläggningsplatsen blir då att det ska finnas ett tillräckligt stort område med salt grundvatten, att djupet ska vara sådant att ändringar i grundvattenflöden i samband med nedisningar inte påverkar slutförvaret och att frekvensen av konduktiva sprickzoner ska vara låg. För att underlätta byggandet bör även någorlunda isotropa spänningsförhållanden råda. Även om tillgängliga data tyder på att den djupa berggrunden skulle kunna tillhandahålla gynnsamma förhållanden för deponering i djupa borrhål så behöver man skapa en bättre underbyggd bild av hur dessa förhållanden uppstår och vilka hot mot dem som kan föreligga. De undersökningar som behöver göras för att ge svar på dessa frågor måste göras i flera kilometer djupa borrhål. Detta kräver utveckling av tillförlitliga undersökningsmetoder. Det är idag inte möjligt att överblicka kostnaderna för sådana undersökningar.

4 Kärnteknisk säkerhet vid hantering

4.1 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 (SSMFS 2008:1). Regler finns dessutom för kärntekniska anläggningars fysiska skydd (SSMFS 2008:12) samt för kärnämneskontroll (SSMFS 2008:3). 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 kravbilderna 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.

Ett grundläggande krav för en slutförvarsanläggning är att anläggningen är så konstruerad att skador på kapseln som leder till läckage av radioaktiva ämnen inte kan uppstå. Vidare ska åtgärder vidtas för att begränsa stråldoser till personal. Detta kan ske genom att undvika onödig hantering av kapseln och att arbetsmoment sker fjärrstyrt och i strålskärmade utrymmen.

I detta kapitel diskuteras säkerheten vid hantering av använt kärnbränsle i ett KBS-3-förvar respektive vid deponering i djupa borrhål. Fysiskt skydd och kärnämneskontroll diskuteras i kapitel 6.

4.2 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 strålskärmning 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 strålskärmade 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. 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 deponeringshållens 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 ansökningarna om tillstånd att uppföra ett slutförvar ingår en säkerhetsanalys för driftskedet (SKBdoc 1091141). Denna har genomförts i flera steg varav det första steget är en inventering av tänkbara förväntade händelser (störningar) och ej förväntade och osannolika händelser (missöden). Händelserna har därefter inordnats i händelseklasser som definierats efter frekvensintervall. För händelser som identifierats i det första steget utreds till vilken eller vilka av konsekvensområdena, radiologisk olycka med utsläpp, barriärpåverkan (möjlig påverkan på säkerheten i ett långtidsperspektiv) eller radiologisk olycka som leder till förhöjd persondos, händelsen kan hänföras. För varje händelseklass definieras vilken tillåten konsekvens (acceptanskriterium) den ska värderas mot. Syftet med indelning av händelser till frekvensbaserade händelseklasser med sina acceptabla konsekvenser är att uppnå en balanserad riskprofil för anläggningen. Frekventa händelser tillåts ge begränsade konsekvenser medan osannolika händelser kan tillåtas ge större konsekvenser.

De händelsegrupper som studeras är följande:

- Lyft- och förflyttningshändelser
- Inre händelser
- Yttre händelser
- Kriticitet.

Med lyft- och förflyttningshändelser för kapseln avses händelser som leder till mekanisk påverkan på kapseln, till exempel tappad kapsel vid omlastning (lyft) och tappad transportbehållare från transportfordon. Inom gruppen lyft och förflyttningshändelser ingår även händelser som kan påverka barriärerna.

Inre händelser är händelser som har sitt ursprung inom anläggningen och som kan medföra påverkan på kapseln, barriärer eller medföra radiologisk olycka som leder till förhöjd persondos. Exempel på inre händelser är brand, översvämning och ventilationsfel.

Yttre händelser representerar händelser som har sitt ursprung utanför anläggningen. Exempel på händelser är vind- och snölast, extrema havsvattennivåer och jordbävning.

Kriticitet – Kriticitetssäkerhet. Här avses händelser som kan leda till kriticitet i kapseln och som därmed kan leda till radiologiska olyckor.

I kriticitetssäkerhetsanalysen (SKBdoc 1193244) är utgångspunkten att de fyllda kapslarna ska ha en effektiv neutronmultiplikationsfaktor, k_{eff} , som är mindre än 0,95 även om kapslarna vattenfylls. Detta kriterium uppfylls inte om kapslarna fylls med obestrålat bränsle. Om däremot in-teckning tas i bränsleelementens utbränning uppfylls kriteriet för huvuddelen av bränsleelementen. Sådana element som inte uppfyller kriteriet kan lagras i kapslar med färre bränsleelement alternativt sammanföras med element med lägre anrikning eller högre utbränning.

4.3 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 strålskärming vid hanteringen är likartade som i ett KBS-3-förvar trots att mängden bränsle per kapsel är mindre. Detta innebär bland annat att det vid deponeringsanläggningen måste finnas en anläggning där anländande kapslar med använt kärnbränsle kan tas emot och förberedas för deponering. Denna hantering måste ske fjärrstyrt i strålskärmade utrymmen. När kapseln lämnar denna mottagnings- och hanteringsanläggning ska den befinna sig i en lämplig strålskärmad transportbehållare för transport till ett deponeringshål.

Vid deponeringshålet måste det finnas möjlighet att ta ut kapseln ur transportbehållaren, koppla ihop den med deponeringsutrustning och eventuellt med andra kapslar till den kapselsträng som sedan ska föras ned i hålet. Hela denna hantering måste ske fjärrstyrt i ett strålskärmat utrymme. 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 strålskärmnings-åtgärder och deponeringsrutiner.

Kriticitetsrisken i samband med hantering 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. Den mindre bränslemängden medför sannolikt att reaktiviteten blir lägre än för KBS-3-kapseln.

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 dock 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. Beswick et al. (2014) har preliminärt uppskattat den maximala fallhastigheten för en kapsel i borrhålet till mellan 0,5 och 2 meter per sekund beroende på kapselns vikt vid ett förhållande mellan kapselns ytterdiameter och foderrörets innerdiameter på 0,85. I den anläggningsutformning som beskrivs i avsnitt 2.2.1 är detta förhållande nästan 0,9 medan kapselsträngen är tyngre än den enskilda kapsel som författarna har räknat med. Dessa skillnader tillsammans med det faktum att sammansättningen av borrhålvätskan, och därmed dess hydrodynamiska egenskaper, inte är definierad gör att man inte kan förutsäga fallhastigheten med någon större precision. Om en anläggning för deponering i djupa borrhål skulle planeras skulle givetvis denna typ av analys behöva genomföras liksom en analys av eventuella kapselskador som skulle kunna uppstå vid en sådan olycka.

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 borrhsträngen 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 scenario hanteras i analysen av den långsiktiga säkerheten, se avsnitt 5.3.

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. Denna kan behöva samlas upp i strålskärmade tankar för vidare hantering (Grundfelt 2013).

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. Enligt Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrift om säkerhet i kärntekniska anläggningar (SSMFS 2008:1) ska en anläggning utan dröjsmål kunna bringas i säkert läge om den visar sig fungera på ett oväntat sätt eller då det är svårt att avgöra hur allvarlig en brist i en barriär är. Detta torde mot bakgrund av det ovan sagda var mycket svårt att åstadkomma vid deponering i djupa borrhål.

4.4 Sammanfattning

Ett slutförvar för använt kärnbränsle är en kärnteknisk anläggning. En sådan anläggning måste utformas så att den uppfyller de regler för utformning och drift av kärntekniska anläggningar som framgår av lagar, förordningar och föreskrifter. En ansökan om tillstånd för att uppföra en slutförvarsanläggning ska bland annat omfatta en redogörelse för hur säkerheten för personal och kringboende ska upprätthållas i anläggningen. En sådan redogörelse för KBS-3-systemet ingår i den ansökan som SKB lämnade in 2011. Konceptet djupa borrhål har inte nått det utvecklingsstadium där en sådan analys kan genomföras och i litteraturen finns ingen redovisning i dessa frågor.

5 Långsiktig säkerhet

5.1 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-Site (SKB 2011). SR-Site redovisar en värdering av den långsiktiga säkerheten för ett slutförvar beläget i Forsmark och ingår i den ansökan om tillstånd att uppföra ett slutförvar enligt KBS-3-metoden i Forsmark som SKB lämnade in 2011. 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 är det emellertid möjligt att på en övergripande nivå få en bild av den långsiktiga säkerheten.

I SR-Site 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 5.2. Avsnitt 5.3 innehåller en ansats till en motsvarande framställning för konceptet djupa borrhål så långt detta är möjligt.

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 och allmänna råd om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall*, SSMFS 2008:37, samt *Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd 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.

Förvarssystemets framtida tillstånd beror på:

- Initialtillståndet, som avser de sista kontrollerbara och dokumenterbara egenskaperna i produktionslinjen för respektive barriär/anläggningsdel i förvaret.
- 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 förvarssystemet, 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 beskrivas exakt. Beskrivningarna kommer därför att vara behäftade med vissa osäkerheter. Hanteringen av osäkerheter är därför viktig i en säkerhetsanalys.

5.2 KBS-3

5.2.1 Säkerhetsprinciper och barriärfunktioner

Säkerhetsfilosofin bakom KBS-3-metoden bygger i sina huvuddrag på följande principer (SKB 2011):

- 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 i en kapsel.
- 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.
- Förvaret ska utformas och byggas så att temperaturer som kan ha skadlig effekt på barriärernas långsiktiga egenskaper undviks.
- Förvaret ska vara utformat och byggt så att strålningsinducerade processer som kan ha en signifikant negativ påverkan på de tekniska barriärerna 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 5-1 för funktioner som påverkar inneslutningen av bränslet och i figur 5-2 för funktioner som relaterar till retardation. (SKB 2011).

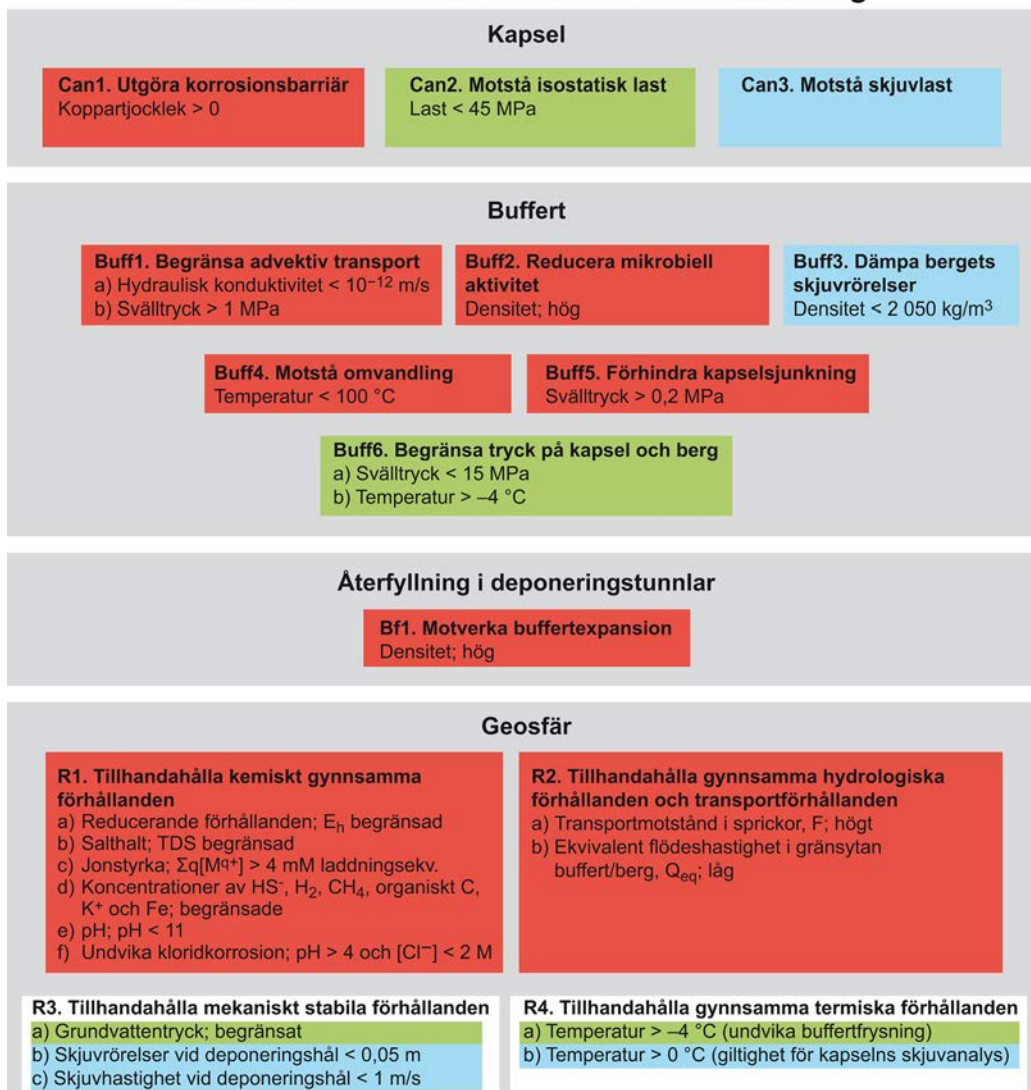
KBS-3-metoden har vid flera tillfällen genomgått ingående säkerhetsanalyser varav SR-Site är den senast publicerade (SKB 2011). I SR-Site beskrivs och analyseras de risker som kan uppkomma dels för en referensutveckling, dels för ett antal scenarier. Dessa analyser sammanfattas i efterföljande avsnitt.

5.2.2 Slutförvarets initialtillstånd

En detaljerad beskrivning av slutförvarets initialtillstånd är en viktig utgångspunkt för säkerhetsanalysen. Enligt ovan avser initialtillståndet de sista kontrollerbara och dokumenterbara egenskaperna i produktionslinjen för respektive barriär/anläggningsdel. Tidpunkten då en anläggningsdel kan anses vara i sitt initialtillstånd är inte självklar utan måste definieras i säkerhetsanalysen. I SR-Site har initialtillståndet för de tekniska barriärerna definierats som tillståndet vid tidpunkten för deponering/installation medan det för geosfären och biosfären har definierats som det naturliga tillståndet innan byggstart för slutförvaret (SKB 2011). Detta medför att de interna processer och den yttre påverkan som måste hanteras i säkerhetsanalysen i vissa avseenden kommer att innefatta även byggprocessen.

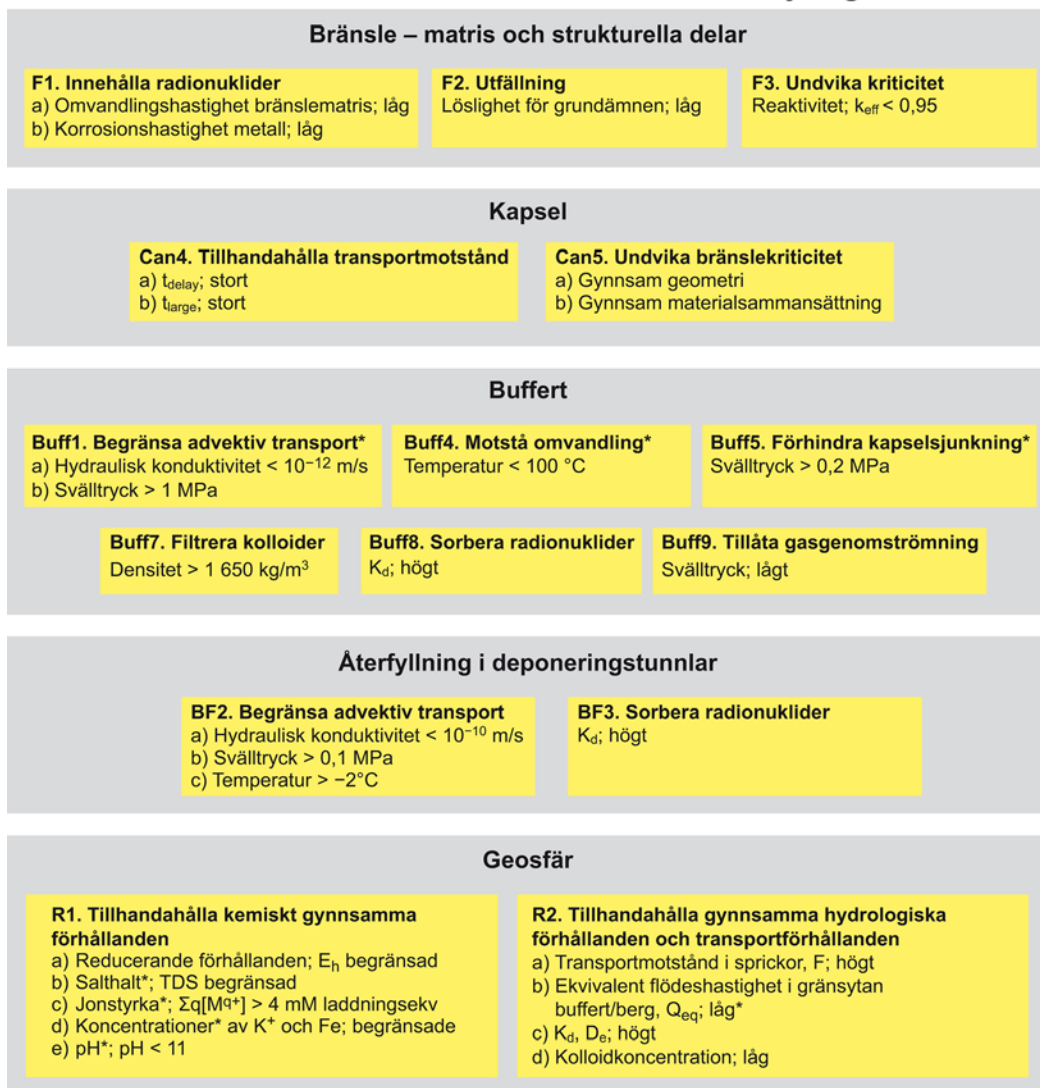
SKB har utvecklat ett antal konstruktionsförutsättningar som redovisar vilka krav som behöver ställas för att säkerställa att det byggda förvarets alla delar ska uppnå det initialtillstånd som utgör utgångspunkten för säkerhetsanalysen. Övergripande konstruktionsförutsättningar för förvaret redovisas i "Repository production report" (SKB 2010c) och krav som ställs på val av bränsleelement för inkapsling redovisas i "Spent fuel report" (SKB 2010d). En första uppsättning av konstruktionsförutsättningar och andra krav för olika anläggningsdelar har sedan angetts i de produktionslinjerapporter som ingår i ansökningarna för uppförande av kärnbränsleförvaret (SKB 2010e, f, g, h, i). Det går inte att från början ange alla detaljerade konstruktionsförutsättningar på en viss produkt eller process, utan krav, teknikutveckling och säkerhetsanalys måste i stället tas fram successivt. En revidering av de konstruktionsförutsättningar som redovisades i ansökningarna genomförs för närvarande (SKB 2013a, c).

Säkerhetsfunktioner relaterade till inneslutning



Figur 5-1. Barriärernas säkerhetsfunktioner (fetsstil), säkerhetsfunktionsindikatorer och kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer i KBS-3 som relaterar till inneslutning. Färgkodningen visar hur funktionerna bidrar till kapselns säkerhetsfunktioner som korrosionsbarriär (röd), hållfasthet mot yttre tryck (grön), säkerhet mot skjuvrörelser (blå) (SKB 2011).

Säkerhetsfunktioner relaterade till fördröjning



Figur 5-2. Barriärernas säkerhetsfunktioner (fetstil), säkerhetsfunktionsindikatorer och kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer i KBS-3 som relaterar till retardation. Säkerhetsfunktioner som markerats med en asterisk (*) relaterar även till inneslutning, se figur 5-1 (SKB 2011).

5.2.3 Referensutveckling och risker

I SR-Site beskrivs två varianter av en referensutveckling under en miljon år. Den ena är 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 är 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 2011). 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 omfattar fyra tidsperioder:

- Förfarets uppförande- 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 analyseras utvecklingen till följd av de processer som verkar inom slutförvaret och den yttre påverkan som det utsätts för. Generellt visar analysen att slutförvaret kan förväntas utsättas för de största påfrestningarna i samband med nedisningar.

Analysen av anläggningens uppförande- och driftsfas 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. En slutsats av analysen är att utvecklingen under denna period inte leder till några störningar som påverkar säkerheten efter anläggningens förslutning förutsatt att byggnation och drift sköts i enlighet med de konstruktionsförutsättningar och andra krav som ställts upp, se föregående avsnitt. I analysen listas dock några frågeställningar där osäkerheter bör belysas i analysen av efterföljande tidsperioder respektive hanteras i uppdateringen av konstruktionsförutsättningarna. Det förra gäller till exempel utsträckningen och kontinuiteten av den sprängskadade zonen runt tunnlar och deponeringshål och risken för kanalbildning i buffert och återfyllning på grund av vatteninflöde under driftperioden. Det senare gäller till exempel uppdatering av kriterierna för största tillåtliga vatteninflöde till deponeringshålen med hänsyn till acceptabel förlust av bentonit på grund av erosion.

Den första tempererade perioden varar i referensutvecklingen i flera tusen år. De första 1 000 åren är av särskild betydelse eftersom Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrift (SSMFS 2008:37) kräver en mer detaljerad redogörelse för slutförvarets utveckling under denna period. Eftersom många tidiga fenomen i slutförvarssystemet inträffar under denna period ger analysen av dessa automatiskt en mer detaljerad redogörelse för de första 1 000 åren. 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.

Återmättningen av förvarsberget kan förväntas ske inom en period av tiotals 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 5–15 år för att sedan långsamt minska i takt med den radioaktiva avklingningen. Den högsta temperaturen ligger för de flesta deponeringshålen under 90 °C (cirka 98 % av hålen) medan sannolikheten för en temperatur som överstiger 95 °C motsvarar mindre än 1 av de totalt 6 000 deponeringshålen.

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 med hänsyn till glacialcykelns termiska, mekaniska, hydrogeologiska och geokemiska påverkan på slutförvarssystemet. De enda identifierade orsakerna till att kapseln riskerar att förlora sin inneslutande förmåga är korrosion i en kapselposition som genomströmmas av grundvatten eller skjuvbrott på grund av ett stort jordskalv. Sannolikheten för att något av detta ska inträffa under den första glacialcykeln har bedömts vara låg.

Under perioden efter den första glaciationscykeln och upp till en miljon år efter deponering, antas i SR-Sites huvudscenario 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 (0–2) 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 referensscenario bedöms vara gynnsammare för slutförvarets säkerhet.

5.2.4 Scenarioanalys och risker

Förutom huvudscenario som baseras på referensutvecklingen enligt beskrivningen i föregående avsnitt, omfattar SR-Site analyser av:

- Ytterligare scenarier baserade på möjligt bortfall av säkerhetsfunktioner,
- Hypotetiska scenarier som belyser barriärfunktioner och
- Scenarier som rör framtida mänskliga handlingar.

I figur 5-3 sammanfattas de scenarier som valts.

Huvudscenario/Referensutveckling Namn	Initialtillstånd Tekniska barriärer	Initialtillstånd Plats	Processhantering	Hantering av externa förhållanden
Basfall	Referens ± Toleranser.	Platsbeskrivande modell (med varianter/ osäkerheter).	Enligt processrapporter.	Referensklimat (upprepning av Weichselglaciationscykeln). Inga framtida mänskliga handlingar (FHA).
Variant med global uppvärmning	Referens ± Toleranser.	Platsbeskrivande modell (med varianter/ osäkerheter).	Enligt processrapporter.	Upptäckt varm period. Inga framtida mänskliga handlingar (FHA).
Ytterligare scenarier baserade på möjligt bortfall av säkerhetsfunktioner ("mindre sannolika" eller "restscenarier" baserat på analysresultat)				
Namn	Initialtillstånd Tekniska barriärer	Initialtillstånd Plats	Processhantering	Hantering av externa förhållanden
Adektion i bufferten	Utvärdera osäkerheter för relevanta initialtillståndsfaktorer, interna processer och externa förhållanden som kan leda till att den aktuella säkerhetsfunktionsindikator inte upprätthålls. Analys av referensutvecklingen används som utgångspunkt. Se ovan.			
Buffertfrysning Buffertomvandling	Se ovan. Beakta vart och ett av de tre bufferttillstånden ovan + intakt buffert vid analys av de tre kapselscenarierna nedan.			
Kapselbrott på grund av isostatisk last	Utvärdera osäkerheter för relevanta initialtillståndsfaktorer, interna processer och externa förhållanden som kan leda till att den aktuella säkerhetsfunktionsindikator inte upprätthålls. Analys av referensutvecklingen används som utgångspunkt. Se ovan.			
Kapselbrott på grund av skjuvfast	Se ovan.			
Kapselbrott på grund av korrosion	Se ovan.			
Hypotetiska restscenarier som belyser barriärfunktioner				
Namn	Initialtillstånd Tekniska barriärer	Initialtillstånd Plats	Processhantering	Hantering av externa förhållanden
Flera fall som tillsammans täcker in KBS-3-barriärerna	Som basfallet av huvudscenario, med undantag av faktorer som avser hypotetisk bortfall av barriärer.			
Scenarier som rör framtida handlingar				
Namn	Initialtillstånd Tekniska barriärer	Initialtillstånd Plats	Processhantering	Hantering av externa förhållanden
Intrång genom borming	Som basfallet av huvudscenario.	Som basfallet av huvudscenario.	Som basfallet av huvudscenario, förutom processer som påverkas av borming.	Referensklimat + borming.
Ytterligare fall av intrång, t.ex. närliggande bergsanläggning	Som basfallet av huvudscenario.	Som basfallet av huvudscenario.	Som basfallet av huvudscenario, förutom processer som påverkas av intrång.	Referensklimat + intrångsaktivitet.
Ej förslutet förvar	Som basfallet av huvudscenario, men otillräcklig förslutning.	Som basfallet av huvudscenario.	Som basfallet av huvudscenario, modifierat enligt initialtillståndet.	Referensklimat.

Figur 5-3. Beskrivning av valda scenarier i SR-Site samt hur initialtillstånd, interna processer och externa förhållanden hanteras i de valda scenarierna (SKB 2011). Gröna celler visar förhållanden som överensstämmer med huvudscenariets basfall och röda celler anger förhållanden som avviker från detta.

Baserat på scenariobeskrivningarna beräknas en stråldos för de olika scenarierna. För att sedan uppskatta scenariernas sannolikhet analyseras alla tänkbara vägar som skulle kunna leda till de definierade barriärtillstånden. För att göra detta används de samband mellan FEP:ar (Features, Events and Processes) och barriärernas säkerhetsfunktioner som beskrivs i projektets FEP-diagram och som utvecklats från projektets FEP-katalog (SKB 2011, 2010j).

Slutsatserna av scenarioanalyserna bestämmer om en kombination är ”mindre sannolik” och således tas med i risksummeringen, eller om den är ett ”restscenario”. Scenarier som är relaterade till framtida mänskliga handlingar och andra scenarier som analyserats, t ex för att skaffa kunskap om barriärfunktioner, tas med om de inte täcks in av resultaten av redan analyserade scenarier.

Slutligen verifieras att de FEP:ar som uteslutits ur analysen uteslutits på korrekta grunder. Vidare analyseras hur heltäckande valet av scenarier är med hänsyn till förvarssystemets tänkbara utvecklingar.

Sammanfattningsvis utgörs scenariometodiken av en undersökning av alla förlopp som kan leda till de tre identifierade typerna av kapselbrott. Metodiken syftar till att utesluta eller kvantifiera brottyperna med hänsyn tagen till alla tänkbara utvecklingsalternativ för systemet. Säkerhetsfunktionerna hos förvarets olika delar och den kunskap om förvarssystemets utveckling som kommer från analysen av referensutvecklingen utgör grunden för ingående utvärderingar av sådana förlopp.

Metodiken säkerställer att kravet i föreskriften SSMFS 2008:21 på att analysera även mindre sannolika scenarier uppfylls.

5.2.5 Resultat från analys av den långsiktiga säkerheten

Resultaten från SR-Site visar att inneslutning är den primära säkerhetsfunktionen för ett slutförvar enligt KBS-3-metoden och att denna upprätthålls effektivt direkt av kapselns egenskaper och indirekt av bergets gynnsamma hydrogeologiska och geokemiska egenskaper. För de osannolika fall där kapseln förlorat sin inneslutande förmåga är fördröjningen av mindre betydelse. Detta beror dels på att de mekanismer som kan leda förlorat inneslutningsförmåga också minskar barriärernas fördröjande förmåga och dels på att dessa händelser kan förväntas inträffa så sent att endast mycket långlivade radionuklider finns kvar i bränslet. För hypotetiska fall där endast kapseln skadas är dock fördröjningen i bufferten och berget av betydelse för att minska effekterna.

Två scenarier bidrar till den beräknade risksumman i SR-Site, nämligen kapselkorrosion och skjuvbrott på kapseln. Summan av de beräknade riskerna ligger med marginal under SSM:s riskkriterium (avsnitt 5.1). För de första 1 000 åren är den enda tänkbara mekanismen för kapselpenetration skjuvbrott på grund av en stor jordbävning. Risken från detta scenario har beräknats uppgå till ungefär 1/10 000 av SSM:s riskkriterium. Även för den första glacialcykeln är skjuvbrott den enda mekanismen som bidrar till risksumman. Den beräknade risken ligger på 1/100 av SSM:s riskkriterium. För tiden fram till 1 miljon år kommer risksumman att bestå av bidrag från både skjuvbrotts- och korrosionsscenarioet med en beräknad risksumma som uppgår till 1/10 av SSM:s riskkriterium.

5.3 Djupa borrhål

5.3.1 Säkerhetsprinciper och barriärfunktioner

Den *primära* säkerhetsfunktionen hos slutförvaret är mycket långsam grundvattenströmning på deponeringsdjup som skapas av en kombination av bergets förväntat låga vattengenomsläpplighet och en densitetsskiktning skapad av hög salthalt i det djupa grundvattnet. Den *sekundära* säkerhetsfunktionen är, liksom för KBS-3-metoden, att den naturliga bergbarriären fördröjer radionuklider som frigörs 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.

Vid deponering i djupa borrhål går det inte att kontrollera och verifiera de tekniska barriärernas täthet efter genomförd deponering av det använda bränslet. Som redovisas nedan förväntas korrosion av kapselmateriell att gradvis leda till en godsfortunning i kapslarna så att de vid någon tidpunkt tappar förmågan att bära lasten från ovanliggande kapslar. Konsekvenserna av detta beskrivs närmare i avsnittet om referensutveckling nedan.

På grund av kapselns begränsade livslängd och deponeringsmuddens begränsade skyddsförmåga kan man således inte tillgodoräkna sig någon långsiktig inneslutningseffekt av de tekniska barriärerna i säkerhetsanalysen. Som redovisats i avsnitt 2.2.3 finns det även en risk att kapslar skadas under själva deponeringsförfarandet. Dessa förhållanden innebär att det finns en risk att förvaret kommer att innehålla kapslar som initialt är otäta och att radionuklider kan frigöras. Det finns även en risk att skadade kapslar fastnar högre upp i borrhålet på ett sådant sätt att radionuklider kan frigöras, se vidare nedan.

I avsnitt 5.3.2 redovisas en kort sammanfattning av andra studier av deponering i djupa borrhål. I avsnitten 5.3.3 och 5.3.4 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.

5.3.2 Genomförda säkerhetsanalyser och andra studier

Utvecklingen av konceptet deponering i djupa borrhål befinner sig tekniskt ännu i ett tidigt stadium. I bilaga 1 redovisas en sammanställning av rapporter i vilka deponering i djupa borrhål belyses ur olika aspekter. Flera av de rapporter som listas i bilagan återfinns även som referenser i denna rapport.

SKB:s arbeten med djupa borrhål startade med Pass-projektet (SKB 1992). Detta arbete betraktades internationellt länge som det mest genomarbetade (se t.ex. Nirex 2004, MIT 2003). Förutom de övergripande och jämförande analyser av konceptet som genomförts inom SKB:s program har det genomförts några preliminära säkerhetsanalyser av specifika frågeställningar kopplade till det utvecklingsprogram som bedrivs vid SNL (Brady et al. 2009, Arnold et al. 2012, 2013).

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 transport av radionuklider uppåt i borrhålet eller i den störda zonen runt borrhålet. I rapporten görs även en övergripande genomgång av så kallade "Features, Events and Processes" (FEP) i vilken den potentiella vikten av olika FEP:ar har angetts. Övergripande slutsatser är att termisk-hydrologisk-kemisk-mekanisk koppling i närvaro av densitetsstratifierat grundvatten liksom den långsiktiga funktionen av borrhålsförslutningen behöver analyseras ytterligare. Ingen analys redovisas av konsekvenserna av kapslar som fastnat i borrhålet under deponeringen eller andra missödes scenarier.

Herrick et al. (2011) har gjort en känslighetsanalys av kopplingen mellan borrhålsförslutningens kvalitet och slutförvarets påverkan på människors hälsa. Målsättningen var att definiera den maximala permeabiliteten i förslutning och störd zon som ger acceptabla konsekvenser för människors hälsa. Utsläppen av radioaktiva ämnen domineras av ^{129}I . De radiologiska konsekvenserna bedöms vara acceptabla om förslutningens permeabilitet underskrider 10^{-16} m^2 (Arnold et al. 2011), det vill säga motsvarande ett lermaterial.

Clayton et al. (2011) genomför en preliminär säkerhetsanalys kombinerad med känslighetsanalyser av vissa subsystem. Några slutsatser är att diffusion är den dominerande transportmekanismen med intakt förslutning medan degradering av förslutningarna kan leda till advektiv transport genom borrhålet. Författarna betonar vikten av att förslutningarna installeras på ett bra sätt och att de mekanismer som kan driva strömning uppåt genom borrhålen elimineras.

USA:s energidepartement, U.S. DOE, har nyligen presenterat en bred analys av vilka krav som existerande avfallsformer ställer på ett slutförvars förläggning och utformning (U.S. DOE 2014). Slutsatserna från studien är att samtliga studerade koncept för byggda förvar (salt, lerbergarter och kristallina bergarter) har tekniska förutsättningar för att ta emot alla avfallssorter som ingått i studien och att strategin deponering i djupa borrhål är bäst anpassad för små avfallspaket. Samtliga utvärderade alternativ bedöms ha förutsättningar att uppnå relevanta lagstiftningskrav på skydd för människor och miljö. Utvärderingen har inte omfattat deponering i djupa borrhål av avfall som på grund av sin storlek inte kunnat passas in i denna strategi.

5.3.3 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 slutförvarskoncepten 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. De delsystem som är aktuella är kapseln, bufferten, förslutningen och den naturliga bergbarriären. Nedan beskrivs 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.

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. Det finns en risk för att kapslar skadas redan vid deponeringen. Till detta bidrar att kapslarna är relativt tunnväggiga och 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 kapselmateriale som föreslagits är kolstål som i den aktuella miljön kommer att korrodera genom reaktion med vatten med en förväntad hastighet på upp till 10 µm/år eller något mer (Grundfelt och Crawford 2014). På grund av korrosionen förtunnas stålkapseln gradvis. Vid någon tidpunkt när korrosionen har förtunnat godset i kapslarna kommer de att ge vika under lasten av de ovanföriggande kapslarna. Denna process förväntas ta sin början i den nedre delen av varje kapselsträng där lasten av ovanliggande kapslar är som störst och i storleksordningen 60 ton. Godsförtunnningen leder även till att risken för buckling av kapslarna på grund av yttre övertryck ökar med tiden. Detta kan motverkas genom att fylla tomrum i kapslarna med till exempel kiselkarbidpulver (Hoag 2006) eller andra lämpliga material.

För att fastställa tidsförloppet för ovanstående process krävs en ingående analys av korrosionsförloppet och dess påverkan på kapselns hållfasthet. Den föreslagna kapselns godstjocklek är 11 mm vilket innebär att den är genomkorroderad efter cirka 1 000 år med ovan angiven korrosionshastighet. Det är därför rimligt att anta att de undre kapslarna börjar ge vika efter något eller några hundratals år. Andra kapselmateriale med lägre korrosionshastighet såsom till exempel nickel- eller titanlegeringar skulle kunna väljas (Grundfelt och Crawford 2014). Den aggressiva miljön i deponeringszonen med förväntade temperaturer på 80–100 °C och salthalter på 50–100 g/l medför emellertid att även livslängden på mer korrosionsbeständiga kapselmateriale begränsas. Valet av kapselmateriale måste även optimeras med hänsyn till de olika materialens mekaniska och andra egenskaper, till exempel dess motstånd mot väteförsprödning.

Kapslarnas livslängd kommer på grund av ovan beskrivna processer att vara kortare än vad som ges av ett rent korrosionsgenombrott. Det är också värt att notera att när en kapsel har gett vika kommer det eller de inneslutna bränsleelementen att belastas av den ovanliggande delen av kapselsträngen. Det är då högst sannolikt att även bränsleelementen ger vika varvid urankutsarna i bränsleelementen friläggs.

När bränslet har frilagts kommer den andel av de radioaktiva ämnena i bränslet som återfinns på kutsarnas yta eller är lättillgänglig på korngränssytor i kutsarna, den så kallade Instant Release Fraction (IRF), att frigöras, varvid borrhålsvätska och grundvatten i berget intill borrhålet snabbt kontamineras. I ett längre tidsperspektiv kommer sedan grundvattnet att gradvis lösa upp urandioxidmatrisen i kutsarna och samtidigt frigöra de radionuklider som återfinns i matrisen. 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. Vid deponering i djupa borrhål är detta grundvatten varmt (80–100 °C) och salt (50–100 g/l totalt saltinnehåll). Den förhöjda temperaturen kan förväntas öka upplösningshastigheten. Det är emellertid inte självklart hur en hög salthalt påverkar upplösningen.

Buffert

Borrhålsgeometrin begränsar tjockleken av den deponeringsmud som omger kapslarna till maximalt 5 centimeter. Om kapslarna inte centreras i borrhålet kommer mudden delvis att vara tunnare. Deponeringsmuddens sammansättning är inte bestämd. En blandning av bentonit och syntetisk olja har föreslagits på grund av dess smörjande effekt under inplaceringen av kapslar (Arnold et al. 2011, 2012). I princip borde även blandningar av bentonit och vatten kunna användas varvid eventuella komplikationer från introduktionen av en oljefas i borrhålet undviks. Mudden bör, för att utgöra en så effektiv barriär som möjligt, ha en så hög inblandning av bentonit som möjligt. Dock får inte inblandningen bli så hög att mudden blir ett väsentligt motstånd vid nedsänkningen av kapselsträngen. Bentonitens egenskaper såsom gelstabilitet, strömnings- och diffusionsmotstånd samt retardation på grund av sorption kommer även att påverkas negativt av det salta grundvattnet som förväntas på deponeringsdjup och som med stor sannolikhet utgörs av en kalciumdominerad saltlösning (brine) (Grundfelt och Crawford 2014, Marsic och Grundfelt 2013b, Smellie 2004).

Buffertens inneslutande respektive fördröjande effekt måste på grund av ovanstående antas ha en försumbar effekt på säkerheten vid deponering i djupa borrhål. Vid deponering i djupa borrhål är det dessutom inte möjligt att kontrollera och verifiera vilken kvalitet bufferten har under eller efter deponeringen.

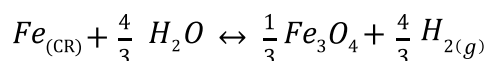
Förslutningen

De studier som citeras ovan i avsnitt 5.3.2 har i stor utsträckning fokuserat på analys av uppåtriktad transport genom borrhålet på grund av termisk konvektion. En av slutsatserna är att borrhålets förslutning är viktig för att hindra denna uppåtriktade transport. Utformningen av förslutningen är också en central punkt i det forskningsprogram som presenterats av Arnold et al. (2012, 2013). Även Beswick et al. (2014) diskuterar förslutningen av borrhålet som en viktig del av de ingenjörsmässiga utmaningar som deponering i djupa borrhål medför.

Termiskt driven grundvattenströmning i samband med deponering i djupa borrhål har analyserats flera gånger i SKB:s arbete (Claesson et al. 1992, Marsic et al. 2006, Marsic och Grundfelt 2013a). I dessa studier har den resulterande uppåtriktade transporten i borrhålet generellt varit av mindre vikt än i de ovan citerade studierna. Anledningen till detta är främst att värmeutvecklingen från de deponerade kapslarna är mindre i SKB:s studier på grund av längre avklingning före deponeringen och mindre bränslemängd i varje kapsel. Marsic och Grundfelt (2013a) visar dock att värmeutvecklingen kan störa saltsprångskiktet och därmed den stabila densitetsskiktningen om borrhålsförslutningen har en hydraulisk konduktivitet på 10^{-7} m/s eller högre. I SNL:s referensdesign (Arnold et al. 2011) anges att permeabiliteten i förslutningszonen inte får överstiga 10^{-16} m² (motsvarar en hydraulisk konduktivitet på cirka 10^{-9} m/s).

En annan potentiell drivkraft för uppåtriktad strömning genom borrhålen är gasbildning på grund av korrosion av kapslar och foderrör. Brady et al. (2009) tar upp gasbildning i sin FEP-katalog och anger samtidigt att man troligen skulle kunna utesluta denna process i en analys av deponering i djupa borrhål. Samtidigt anges att det potentiellt krävs en väsentlig arbetsinsats för att på ett robust sätt kunna motivera uteslutningen.

Grundfelt och Crawford (2014) redovisar en konceptuell modell för gasbildning samt beräknar storleken på gasbildningen och diskuterar konsekvenserna av denna. Modellen baseras på anaerob korrosion i vilken järn reagerar med vatten under bildning av magnetit och vätgas:



I ett första steg görs en uppskattning av jämviktstrycket för denna reaktion, det vill säga det tryck där reaktionen avstannar på grund av att bakåtreaktionen går lika fort som korrosionen. I den miljö med en kalciumdominerad saltlösning (brine) med en total salthalt på mellan 5 och 10 vikt-%, en temperatur som i botten av deponeringshålet närmar sig 100 °C och ett hydrostatiskt tryck som inom deponeringszonen varierar i intervallet 30 – 50 MPa blir det beräknade jämviktstrycket strax över 100 MPa, det vill säga med marginal högre än det hydrostatiska trycket i deponeringszonen. Detta innebär att reaktionen kommer att fortsätta till dess att järnet är förbrukat.

I nästa steg görs en beräkning av den förväntade gasutvecklingstakten från korrosionen av kapslar och foderrör i deponeringszonen. Med en korrosionshastighet på 10 $\mu\text{m}/\text{år}$ för stålet fås en total gasutvecklingstakt på upp till 180 $\text{Nm}^3/\text{år}^4$ från deponeringszonen. Om hänsyn tas till det hydrostatiska trycket i deponeringszonen fås en lokal gasbildningstakt i botten av deponeringszonen på 0,044 liter per meter borrhål och år. Då den tillgängliga porvolymen i borrhålsmudden är cirka 20 liter per meter borrhål motsvarar gasutvecklingen i botten av deponeringszonen en porvolym på cirka 450 år.

Den vätgas som bildas kommer att röra sig uppåt genom borrhålet. Även om deponeringszonen segmenteras av de betongproppar som gjuts för att bära vikten av kapselsträngarna kommer det att finnas fri väg uppåt åtminstone i spalten mellan foderrör och borrhålsvägg. De gasbubblor som bildas långt ner i borrhålet kommer att expandera på grund av minskande hydrostatiskt tryck när de stiger samtidigt som gas som bildas högre upp läggs till. Nettoeffekten blir ett ökande gasflöde högre upp i deponeringszonen.

Gastransporten och dess konsekvenser är svåra att simulera kvantitativt. Bubbelflöde är generellt svårt att simulera när, som i föreliggande fall, skillnaden i densitet mellan dispergerad och kontinuerlig fas och tryckskillnaden längs flödesvägen båda är stora. I det föreliggande fallet ökar komplexiteten dessutom av att borrhålsmudden är ett icke-Newtonskt fluidum. Analysen har dock visat att gas kommer att bildas och potentiellt skapa en drivande kraft för uppåtriktad transport genom borrhålet och i berget närmast detta. Denna mekanism behöver således ingå i underlaget för dimensioneringen av borrhålsförslutningen.

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 mer eller mindre stagnant under mycket långa tider. Ett sådant system kan också förväntas förbli stabilt under lång tid om förhållandena förblir ostörda.

Mängden geovetenskapliga data från stora djup i kristallint berg är starkt begränsad. SKB har vid flera tillfällen låtit göra genomgångar av befintliga data (Juhlin et al. 1998, Smellie 2004, Marsic och Grundfelt 2013b). Dessa genomgångar bekräftar i princip den allmänna bilden av ett salt djupt grundvatten som under mycket lång tid (miljoner år) har varit isolerat från det meteoriska systemet. Smellie (2004) liksom Marsic och Grundfelt (2013b) anger att detta djupa salta grundvatten sannolikt är ett gammalt meteoriskt vatten som har fått sin sammansättning genom växelverkan med mineralerna i berget.

Tsang och Niemi (2013) påpekar att hydrogeologin under 1 000 meters djup fortfarande är ett öppet forskningsområde. Ofta är frekvensen av permeabla zoner låg och de zoner som finns har ofta begränsad konnektivitet. Detta kan ge upphov till tryckskillnader mellan olika närliggande flödesceller som då inte är i hydrodynamisk jämvikt med varandra. Genom rörelser i berget och kemiska processer kan dessa strukturer ändras över tid och ge upphov till en dynamisk permeabilitet. Även hydrodynamisk diffusion mellan flödesceller som inte är i jämvikt kan ge upphov till transport. Författarna påpekar att det stora djupet i sig skapar mättekniska problem av sådan art att både mätmetoder och metoder för utvärdering av data behöver utvecklas.

Om 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 med en borrhålsud. 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, se föregående avsnitt.

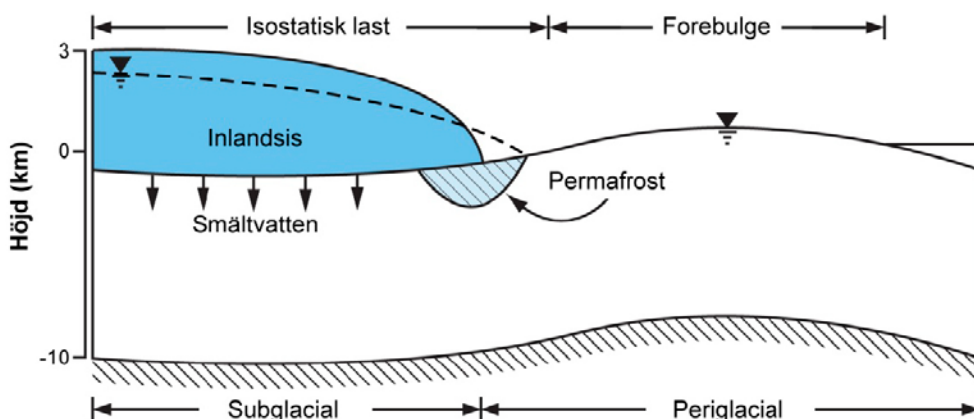
⁴ Nm^3 – Normalkubikmeter gas beräknad vid atmosfärstryck och 0 °C

Förändringarna hos klimatrelaterade processer såsom permafrost, inlandsis och strandlinjeförskjutning som beskrivs för den cirka 120 000 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 5-4 (Jaquet och Siegel 2006). Med dagens kunskap kan vissa saker sägas om de initierande processerna, men mycket litet om effekterna på slutförvarets långsiktiga säkerhet.

De största förändringarna i grundvattenflöde i ett 100 000 års perspektiv förväntas i samband med nedisningar (SKB 2011, Jaquet och Siegel 2003, 2006). Den största påverkan på den hydrauliska gradienten och därmed på grundvattenrörelsen, fås när den branta iskanten avancerar eller drar sig tillbaka över förvarsområdet. I samband med detta är det troligt att övergångszonen mellan det ytliga grundvattnet med låg salthalt och det djupare liggande salta grundvattnet påverkas och eventuellt förskjuts nedåt, vilket medför att de stabila och stagnanta grundvattenförhållandena på förvarsdjup riskerar att påverkas negativt. Effekterna kan förväntas bli mindre i den undre delen av ett förvar än i den övre, på grund av det större avståndet till övergångszonen. Dessa samband bekräftas kvalitativt av resultaten av modellberäkningar av variationer i salthalt, tryck och grundvattenflöde i samband med en isfrontspassage över förvarsområdet (Vidstrand och Rehn 2010). Det bör samtidigt noteras att inga beräkningar av radionuklidtransport från de djupa som är aktuella vid deponering i djupa borrhål har genomförts eftersom det saknas tillräckliga kunskaper för att kunna kvantifiera de processer som påverkar en sådan transport.

Permafrost kan förväntas påverka de övre delarna av förslutningszonen genom frysning. Denna fråga har även behandlats vad gäller bufferten för KBS-3 (SKB 2011). 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 fryscyklar (SKB 2011, Näslund 2007).

I anslutning till att en inlandsis drar sig tillbaka förväntas såväl en ökad jordskalvsfrekvens som ökade jordskalvsmagnituder (SKB 2011). Storleken på de skapade spänningarna förväntas dock inte vara tillräckligt stora för att ge upphov till nya sprickor. I kombination med portrycket i berget kan de dock sätta igång reaktivering av sådana förkastningar som före nedisningen ligger nära brottgränsen.



Figur 5-4. Konceptuell modell av grundvattenprocesser och tektoniska processer runt fronten av en inlandsis, efter Jaquet och Siegel (2006).

I SR-Site (SKB 2011) görs en detaljerad analys av konsekvenserna av jordbävningar för kapselns integritet i ett KBS-3-förvar i vilken det visas att kapslar som befinner sig mer än 600 m ifrån angränsande deformationszoner kan förväntas förbli intakta under förutsättning att inga sprickor med radier överstigande 225 m skär igenom deponeringshålen. Sådana sprickor anses gå att detektera i undersökningar som genomförs från undermarksdelen. Vid deponering i djupa borrhål måste sådan sprickkaraktärisering ske från markytan vilket givetvis är mycket svårare än om man befinner sig på förvarsdjup. Det är således mycket svårare att bedöma effekterna av skalv vid deponering i djupa borrhål än för ett KBS-3-förvar.

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).

5.3.4 Scenarioanalys och risker

I den scenarioanalys för KBS-3 som gjordes i SR-Site stipulerades att 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 detta avsnitt redovisas några enkla analyser av störningar i den primära säkerhetsfunktionen (långsam transport på grund av stagnant densitetsskiktat saltvatten), hanteringsmissöden vid deponering av avfallet samt kriticitet i det förslutna förvaret.

Störningar i den primära säkerhetsfunktionen

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:

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

Dessa frågor har diskuterats i föregående avsnitt. De analyser som företagits inom SNL:s arbete (Brady et al. 2009, Arnold et al. 2013) adresserar bara delar av problematiken omkring termiska drivkrafter för uppåtriktad strömning. Även Marsic et al. (2006) och Marsic och Grundfelt (2013a) beräknar termiskt driven strömning. Från beräkningsresultaten kan man dra slutsatsen att utformningen av förslutningen av borrhålen ovanför deponeringszonen är väsentlig för att minska de potentiella effekterna av termiskt driven strömning.

Grundfelt och Crawford (2014) har studerat utvecklingen av vätgas från korrosion av stålkapslar och foderrör av stål. En slutsats av studien är att vätgas kommer att transporteras upp genom borrhålet och berget i borrhålets närhet och att detta kan leda till en uppåtriktad transport av kontaminerad borrhålmud eller kontaminerat grundvatten. En kvantitativ analys av detta är dock komplicerad och ryms inte inom denna studie.

Den kanske mest uppenbara mekanismen för förträngning eller mobilisering av det salta grundvattnet är urspolning i samband med en nedisning. Detta har behandlats i föregående avsnitt. I övrigt finns det, som nämnts, oklarheter i hur det salta vattnet uppkommer och rör sig (t.ex. Tsang och Niemi 2013).

Hanteringsmissöden

Man kan inte utesluta att kapslar fastnar eller skadas i samband med deponeringen. 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?

Grundfelt (2013) har beräknat de radiologiska konsekvenserna av att en kapselsträng fastnar i en borrhålssektion med relativt rörligt vatten, det vill säga ovanför det salta grundvattnet, och inte kan fås loss. Dosen beräknas utgående från frigörelse av IRF⁵ antingen direkt i anslutning till att olyckan inträffar (mekanisk skada på kapseln) eller efter 100 år (korrosionsgenombrott på kapseln). Transporttiden till ytan har antagits vara 100 år. Den beräknade maximala årsdosen från en fastnad kapsel framgår av tabell 5-1 för olika kapselgenombrottsscenarier och bränsletyper. Vid ett tidigt kapselgenombrott dominerar dosen från ¹³⁷Cs och ⁹⁰Sr. Om kapselgenombrottet fördröjs 100 år minskar dessa nuklidens aktivitet och därigenom dosen från dem med ungefär en faktor 10. För kapslar med BWR-bränsle slår denna effekt igenom helt medan dosen från ^{108m}Ag med längre halveringstid håller uppe den beräknade dosen från kapslar med PWR-element.

Tabell 5-1. Beräknad maximal årsdos (mSv) från fastnad kapsel.

Tid för kapselgenombrott	Kapsel med BWR-bränsle	Kapsel med PWR-bränsle
0 år	4,0	5,7
100 år	0,4	2,1

De beräknade doserna ska jämföras med SSM:s riskkriterium (avsnitt 5.1) som motsvarar en dos på 0,014 mSv (SSMFS 2008:37). För att händelsen en ”fastnad kapsel” ska ge en risk som ligger under riskkriteriet måste sannolikhet vara lägre än $2,6 \times 10^{-3}$ för hela anläggningen motsvarande 3×10^{-5} per deponeringshål om kapseln innehåller PWR-element. Sannolikheten för att fler än en kapsel fastnar måste då vara i proportion lägre för att riskkriteriet ska vara uppfyllt. Det finns idag inga möjligheter att på ett trovärdigt sätt avgöra om detta sannolikhetskriterium kommer att uppfyllas i en verklig anläggning.

Kriticitet

Det deponerade använda bränslet är i princip fortfarande klyvbart. Enkla beräkningar av multiplikationsfaktorn för intakta kapslar visar att marginalen till kriticitet är betryggande. När kapseln korroderar kommer så småningom vatten att kunna komma in i kapseln vilket förbättrar modereringen och ökar reaktiviteten. Även om fyllnadsmaterialet i kapseln skulle spolats bort kommer dock kapseln att förbli underkritisk om än med mindre marginal än vid en intakt kapsel. I det scenario för korrosion med därav följande mekaniska försvagning och slutligen kollaps av kapslar som beskrivs i referensutvecklingen i avsnitt 5.3.3 kan man principiellt tänka sig att bränslets geometri förändras genom att kutsar lämnar bränslestavarna och faller neråt i hålet. Om detta kombineras med en urspolning av borrhålsmod så att borrhålet fylls med rent vatten skulle kriticitet i något läge kunna uppstå. Det är givetvis mycket svårt att i dagsläget bedöma hur sannolik en sådan utveckling skulle vara.

Konsekvensen av en kriticitet i deponeringszonen skulle i första hand vara värmeutveckling som skulle leda till kokning av vatten varvid modereringen och reaktiviteten minskar och kedjereaktionen avstannar. När så systemet svalnar kan vatten åter rinna in i borrhålet varvid modereringen ökar så att en ny kriticitet kan uppstå. Rent principiellt skulle denna process kunna pågå så länge som det finns tillräckligt mycket klyvbart material kvar i en kritisk geometri.

⁵ IRF – Instant Release Fraction; den lättlakade del av radionuklidinnehållet i bränslet som återfins på bränslekutsarnas yta eller på korngränssytor som en följd av migration under bränslets tid i reaktorn

5.3.5 Resultat från analys av den långsiktiga säkerheten

Kvantitativa analyser av den långsiktiga säkerheten vid deponering i djupa borrhål har bara genomförts för ett fåtal scenarier. I de amerikanska analyserna har fokus varit på uppåtriktad transport under ostörda förhållanden och med hänsyn till termiskt driven strömning i och omkring deponeringshålen. Även i SKB:s arbeten har termiskt driven strömning analyserats. SKB har även studerat och diskuterat konsekvenserna av gasbildning från korrosion av kapslar och foderrör liksom kriticitet.

De tydligaste slutsatserna från genomförda analyser är att förslutningen av den del av deponeringshålen som ligger ovanför deponeringszonen är viktig för att minska konsekvenserna av uppåtriktad transport. I SNL:s referensutformning ges kvantitativa kriterier för permeabiliteten i förslutningen. Dessa kriterier överensstämmer med resultaten av de beräkningar som genomförts inom SKB:s arbeten.

5.4 Sammanfattning

Såväl primära säkerhetsfunktioner som den förväntade långsiktiga utvecklingen för KBS-3-systemet respektive för deponering i djupa borrhål skiljer sig markant åt. KBS-3-systemets primära säkerhetsfunktion är inneslutningen i kopparkapseln som skyddas av bentonitbufferten vars egenskaper i sin tur skyddas av bergbarriärens egenskaper. Vid deponering i djupa borrhål utgörs säkerhetsfunktionen den fördröjning som fås genom att grundvattnet på deponeringsdjup antas vara väsentligen stagnant på grund av den densitetsskiktning som grundvattnets salthalt ger i kombination med bergets låga permeabilitet. Nedan redovisas först en jämförelse mellan närzonsbarriärerna i de båda förvarskoncepten. Därefter beskrivs så långt möjligt den förväntade utvecklingen över tid, referensutvecklingen, för de båda slutförvarstyperna efter förslutning. Slutligen ges en sammanfattande bild av den troliga framtida situationen när det gäller spridning av radionuklider för de båda slutförvarstyperna.

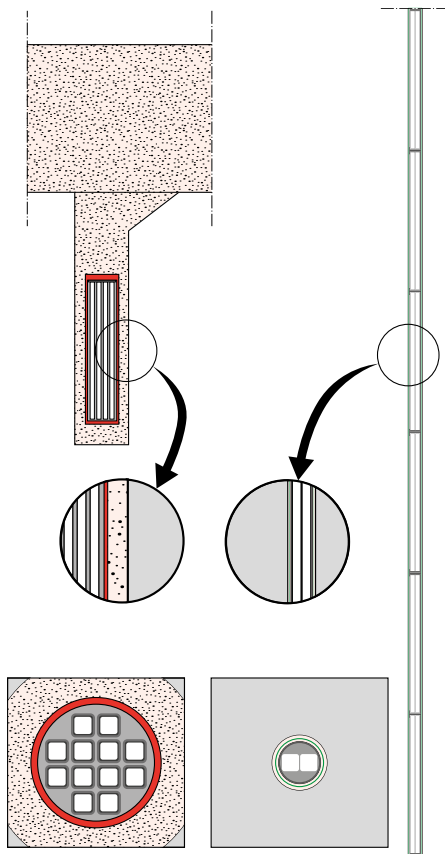
5.4.1 Jämförelse av närzonsbarriärer

I figur 5-5 visas skalenligt närzonen för en kapsel med 12 BWR-element i ett KBS-3-förvar och närzonen för samma mängd använt bränsle vid deponering i djupa borrhål. På grund av den mindre kapseln för deponering i djupa borrhål krävs det sex kapslar för att deponera samma mängd BWR-bränsle som en KBS-3-kapsel rymmer.

I KBS-3-förvaret omges kapseln efter att förvaret återuppfyllts med vatten av en 35 centimeter tjock buffert av utsvälld högkompakterad bentonit. Närzonsgeometrin i denna förvarsutformning är resultatet av flera decenniers utveckling och tester i bland annat Äspölaboratoriet. Genomförda analyser visar att bentonitbufferten i den miljö (geologisk, hydrogeologisk, geokemisk och termisk) som kan förväntas i slutförvaret erbjuder ett gott skydd för kapselns kopparskal så att kapseln kan förväntas förbli intakt under mycket lång tid.

Vid deponering i djupa borrhål är närzonsens utformning styrd av möjliga borrhålsdimensioner, bränsleelementens storlek och krav på borrhålsmuddens egenskaper som ställs av det föreslagna deponeringsförfarandet.

Som tidigare nämnts har en konsensus utvecklats att det bör vara möjligt att med vidareutveckling av känd teknik borra 5 kilometer djupa hål med en diameter på upp till cirka 0,5 meter. SKB har valt att basera sina analyser på deponering av hela bränsleelement och att välja en kapseldimension som rymmer två BWR-element alternativt ett PWR-element. Detta har lett till valet att basera analyserna på de kapsel-, foderrör- och borrhålsdimensioner som anges i tabell 2-1. Detta ger en teoretisk dimension på spalten mellan kapseln och borrhålsväggen på cirka 5 centimeter varav drygt 1 centimeter upptas av foderrör och således omkring 4 centimeter av buffert/borrhålsmudd. I praktiken kan spalten åtminstone ställvis bli något vidare på grund av håldeformation och bergutfall.



Figur 5-5. Skalenlig jämförelse mellan närzonen i ett KBS-3-förvar (vänstra delen) respektive vid deponering i djupa borrhål (högra delen). I båda fallen avser bilden deponering av 12 BWR-element.

Borrhålsmudden har antagits bestå av bentonit och någon vätska, till exempel vatten eller, som föreslagits, syntetisk olja. Muddens förutsättningar för att skydda bränslet mot aggressiva specier i grundvattnet och för att ge ett motstånd mot uttransport av radionuklider torde öka med ökande inblandning av bentonit. En ökad inblandning av bentonit ökar emellertid motståndet mot nedsänkningen av kapselsträngen för att vid någon punkt omöjliggöra att kapselsträngen kan föras ned av egentyngd. Det är i dagsläget inte klarlagt inom vilka gränser borrhålsmudden kan variera för en optimal funktion för ett förvar i djupa borrhål. Det står dock utom tvivel att den borrhålsmudd som omger kapseln, förutom att vara geometriskt tunnare än KBS-3-förvaret, kommer att erbjuda väsentligt sämre motstånd mot materietransport än bufferten i KBS-3-förvaret.

Slutsatsen av det ovan sagda är att KBS-3-förvarets närzonsbarriärer har visats erbjuda ett gott skydd av kapseln och det deponerade använda bränslet medan närzonen vid deponering i djupa borrhål inte kan lämna motsvarande skydd.

5.4.2 Trolig utveckling för KBS-3

När det använda bränslet kommit på plats i KBS-3-förvaret börjar en uppvärmning av bufferten och berget närmast deponeringshålet. Analyser visar att en temperaturtopp nås relativt snabbt (5–15 år). De högsta bufferttemperaturerna kommer att ligga under designkriteriet 100 °C. Uppvärmningen ger upphov till vissa bergmekaniska förändringar vars konsekvenser förs vidare i analysen av huvudscenariot.

Parallellt med uppvärmningen börjar grundvattnet runt anläggningen att stiga. Denna återströmning av grundvatten pågår under i storleksordningen decennier till något 100-tal år. Den enda mekanismen för att ett kapselgenombrott ska inträffa innan den första istidens början är ett skjuvbrott på grund av en större jordbävning. Sannolikheten för detta bedöms vara mycket liten varför det är mycket troligt att samtliga kapslar är när den första istiden börjar.

Under den första istiden ändras de mekaniska, hydrologiska, kemiska och termiska förhållandena i slutförvaret. De identifierade potentiella orsakerna för kapselgenombrott under denna tid (upp till 120 000 år) är korrosion i en kapselposition som genomströmmas av grundvatten eller skjubbrott på grund av ett stort jordskalv. Sannolikheten för att något av detta ska inträffa bedöms vara låg varför kapslarna i den troliga utvecklingen bedöms vara täta vid den första istidens utgång.

I miljonårsperspektivet med sju ytterligare nedisningar förväntas omfattningen av buffertförluster på grund av erosion öka. Detta beräknas leda till korrosionsgenombrott på ett fåtal (0–2) kapslar. Även sannolikheten för större jordskalv ökar med tiden med ökande sannolikhet för skjubbrott på kapseln.

Resultaten från SR-Site visar att riskerna från den ovan beskrivna referensutvecklingen med god marginal underskrider Strålsäkerhetsmyndighetens riskkriterium.

5.4.3 Trolig utveckling för deponering i djupa borrhål.

Utvecklingen av ett förvar i djupa borrhål efter förslutning är inte tillnärmelsevis lika noggrant analyserad som för ett KBS-3-förvar. Beskrivningen nedan bygger på antaganden som bedömts vara rimliga och är mer kvalitativ än för KBS-3-förvaret.

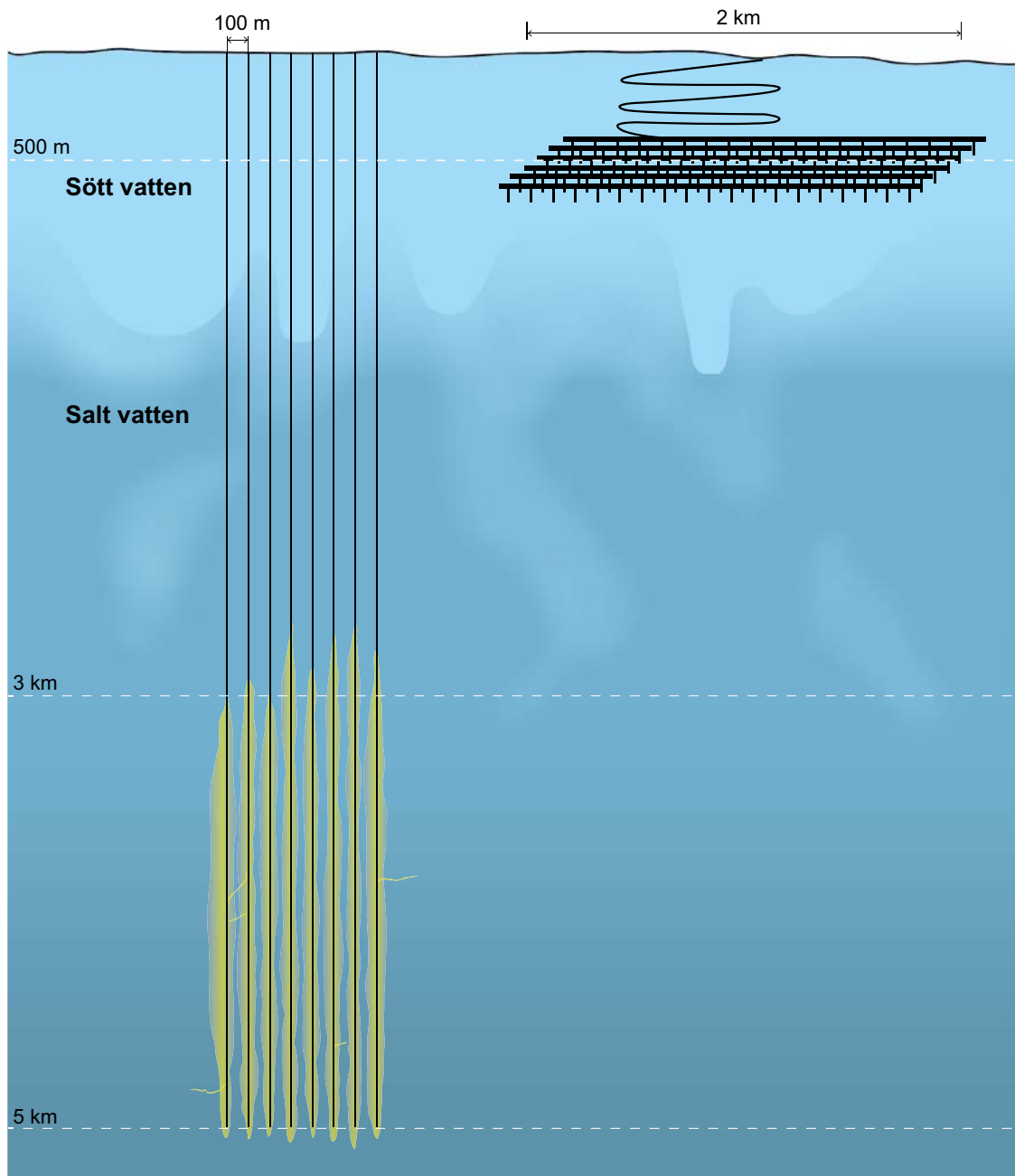
Deponeringshålen kommer att vara fyllda av vatten och borrhålsmud under hela deponeringen. Därför kommer ingen återmättnadsperiod under vilken avfallet delvis är lagrat under torra förhållanden att förekomma. Efter förslutningen kommer borrhålet och berget närmast detta att värmas upp. Tidsförloppet för detta liknar motsvarande förlopp för KBS-3-systemet så att de högsta temperaturerna fås efter 10-tals år. Viktigare i detta fall kan vara att värmepulsen sannolikt varar några hundra år innan den på allvar avklingar. Hur höga temperaturer som nås är givetvis starkt beroende på egenskaperna för det bränsle som deponerats. I de beräkningar som genomförts inom SKB:s arbete ligger temperaturökningen på i storleksordningen 10–20 °C medan de amerikanska beräkningarna ger väsentligt högre temperaturstegringar.

Direkt efter placeringen i deponeringshålet börjar stålkapslarna att korrodera. Detta har två konsekvenser; dels förtunnas godset i kapslarna och dels fås vätgas som en reaktionsprodukt. Godsförtunnningen leder så småningom till att de understa kapslarna i en kapselsträng förlorar så mycket av sin hållfasthet att de ger vika. I detta läge kommer sannolikt även de bränsleelement som finns inne i den trasiga kapseln att deformeras varvid man riskerar att urankutsar friläggas med påföljd att mudden i hålet och grundvattnet i dess omgivning kontamineras med radionuklider. Temperaturstegringen liksom gasbildningen ger båda drivkrafter för uppåtriktad strömning i området runt hålet vilket kan leda till uppåtriktad transport av radionuklider. Omfattningen av detta har inte analyserats för förhållanden som är relevanta för Sverige. I de amerikanska analyserna har mycket låga doser beräknats (Lee et al. 2012). Dessa tar inte hänsyn till de drivkrafter som kan fås från gasbildningen.

5.4.4 Trolig framtida aktivitetsspridningssituation

I figur 5-6 visas schematiskt en trolig situation vad gäller aktivitetsspridningen från ett KBS-3-förvar respektive vid deponering i djupa borrhål. Tidpunkten som illustreras är inte väl definierad men skulle kunna vara i slutet av den nuvarande interglaciala tempererade perioden eller till och med i slutet av nästa nedisning.

Som beskrivs ovan visar resultaten från SR-Site att kapslarna i KBS-3-förvaret kan förväntas vara täta under mycket lång tid. I figuren har därför ingen aktivitetsspridning lagts in runt KBS-3-förvaret. Vid deponering i djupa borrhål kommer kapslarna sannolikt istället att börja ge vika efter några hundra år vilket ger upphov till kontaminering i och omkring borrhålen. Termisk konvektion och gasutveckling kommer att ge en viss vertikal spridning medan långsam lateral grundvattenströmning och diffusion ger en spridning runt borrhålen. Omfattningen av denna spridning har inte analyserats kvantitativt. Beswick et al. (2014) anger att grundvattnet på deponeringsdjup kan röra sig cirka 30 m på 100 000 år. Om hänsyn tas till de drivande krafter i form av, till exempel, termisk konvektion och gasutveckling från korroderande stål borde större grundvattenrörelser än så kunna uppstå. Genom ren diffusion i en spricka kan radionuklider nå 30 m från hålet inom i storleksordningen några tusen år.



Figur 5-6. Trolig framtida aktivitetsspridningssituation för KBS-3-förvar respektive vid deponering i djupa borrhål.

6 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.

6.1 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 huvuddelen av hanteringen av det använda bränslet sker under jord i ett KBS-3-förvar sker denna hantering i sin helhet ovan jord vid deponering i djupa borrhål.

I figur 2-2 visas principutförningen för KBS-3-förvar och i figur 2-3 visas ovanjordsdelen i ett KBS-3-förvar såsom denna ter sig i slutet av uppförandeskedet. Den del av ovanmarksanläggningen där använt bränsle hanteras och hela undermarksdelen utgör skyddat område enligt SSMFS 2008:12.

I figur 2-9 visas ett exempel på hur en anläggning för deponering i djupa borrhål skulle kunna vara utformad. Hela anläggningen upptar en yta av cirka 1 kvadratkilometer. Den del där använt bränsle mottas, lagras, packas om och deponeras ligger inom skyddat område. I figuren har sedan antagits att anläggande av nya borrhål kan försiggå inom bevakat område. Vartefter anläggningen växer flyttas staketen så att både det bevakade och det skyddade området successivt växer. Administrativa byggnader, upplag av borrhax och liknande kan sannolikt ligga utanför bevakat område.

6.2 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 utan upptäckt i ett ordnat samhälle.

6.3 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. I fallet med svälld bentonit, måste tunneln rensas och bentoniten runt kapseln tas bort, innan kapseln kan lyftas. I båda fallen lyfts kapseln upp och in i deponeringsmaskinen. Detta innebär att kravet i 2 kap 2 § SSMFS 2008:1 att man ska kunna bringa anläggningen i säkert läge då den visar sig fungera på ett oförutsett sätt är uppfyllt.

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. Detta medför även att det kommer att vara svårt att kunna sätta anläggningen i ett säkert läge enligt 2 kap 2 § SSMFS 2008:1. Ett återtag kan i varje fall bara röra den senast nedsänkta kapselsträngen eftersom man för att nå underliggande strängar måste ordna genomföringar genom de betongproppar som installerats mellan kapsel-

strängarna. Detta måste bedömas som svårt att genomföra utan risk för att skada kapslar. Noteras kan också att kapselskador kan ha kontaminerat borrhålsmudden och utsidan av kapslarna utan att detta är detekterbart från ytan. Ett återtag av kapslar måste därför kombineras med en beredskap att ta hand om sådana skadade kapslar och eventuell kontaminerad borrhålsvätska samt eventuellt kontaminerade redskap som använts vid återtag.

7 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 har kunnat gå vidare och ansöka om tillstånd att få uppföra ett slutförvar och en inkapslingsanläggning. 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.

7.1 Ledtider och utvecklingsbehov

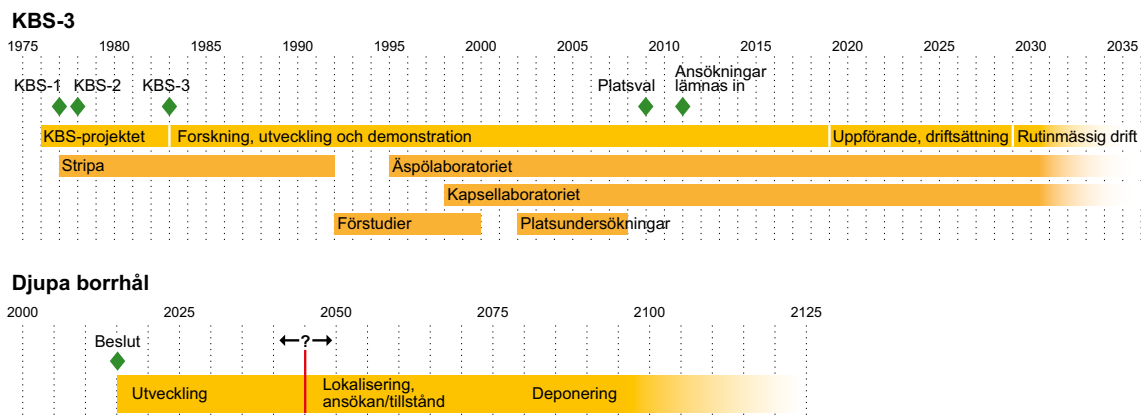
De centrala återstående anläggningarna i ett slutförvar som bygger på KBS-3-metoden är en inkapslingsanläggning och slutförvarsanläggningen. Under våren 2011 lämnade SKB in ansökningar till Mark- och miljödomstolen och Strålsäkerhetsmyndigheten om tillstånd enligt Miljöbalken respektive Kärntekniklagen att få uppföra ett slutförvar för använt kärnbränsle i Forsmark och en inkapslingsanläggning i anslutning till Clab (Centralt mellanlager för använt kärnbränsle) i Oskarshamns kommun.

Efter regeringens beslut om vilket underlag SKB skulle 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 7-1 visas huvudelementen i utvecklingen av KBS-3-konceptet sedan starten av projekt Kärnbränslesäkerhet 1976 tillsammans med en tänkbar tidsplan för utvecklingen av deponering i djupa borrhål förutsatt att ett beslut om sådan utveckling fattas idag.

Huvuddragen i KBS-3-metoden angavs i KBS-3-rapporten som publicerades 1983. I Stripa nedlagda gruva genomfördes en lång rad experiment som ökade förståelsen för hydrogeologi och radionuklidtransport i berggrunden liksom även egenskaperna hos bentonit i storskaliga installationer. I Äspölaboratoriet vidareutvecklar man den kunskap som vanns i Stripaprojektet och testar olika tekniker och utrustningar som i en framtid kan komma till användning i slutförvaret. I Kapsellaboratoriet utvecklas metoder för tillverkning och kvalitetskontroll av kapslar för använt kärnbränsle. Sedan mitten av 1990-talet och fram till platsvalet 2009 har ett systematiskt program för platsval genomförts i samverkan med flera kommuner och andra intressenter. Ansökningar om tillstånd lämnades in 2011. Efter erhållet tillstånd kommer anläggningen att uppföras under cirka 10 år. Deponeringen beräknas sedan ta cirka 40 år. Enligt detta schema skulle deponeringen kunna vara avslutad omkring år 2070 varefter anläggningen kan förslutas.

För att föra fram konceptet djupa borrhål till den kunskapsnivå som krävs för att starta ett platsvalsprogram kommer det att krävas i storleksordningen 30 års utveckling. Lokaliserings- och tillståndsprocessen kan sedan förutses ta omkring 20 år varefter anläggningsuppförande och deponering kan ta 40–50 år. Processen skulle då kunna vara avslutad i sin helhet något eller ett par decennier in på 2100-talet. Denna tid kan möjligen avkortas något genom att utnyttja erfarenheter från andra länder och genom att vissa steg i lokaliserings- och tillståndsprocessen utförs parallellt med utvecklingsarbetet.



Figur 7-1. Illustration av möjliga tidsplaner för slutförvaring enligt KBS-3-metoden respektive vid deponering i djupa borrhål. Observera att tidsskalorna av läsbarhetsskäl har gjorts olika för de båda tidsplanerna.

7.2 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 2013 (SKB 2013b), är den 29:e rapporten och publicerades i december 2013. I rapporten redovisas dels hittills nedlagda kostnader (utfall till och med 2012 jämte prognos för 2013 och budget för 2014) respektive beräknade framtida kostnader uppdelat på ett antal poster. För kärnbränsleförvaret och inkapslingsanläggningen redovisas en total kostnad på omkring 39 miljarder SEK varav drygt 5 miljarder SEK utgörs av redan nerlagda kostnader.

Arnold et al. (2011) redovisar kostnadsberäkningar för deponering i djupa borrhål. Dessa beräkningar bygger på den referensutformning av ett förvar i djupa borrhål som redovisas i rapporten. De beräknade kostnaderna omfattar borrning av deponeringshål, infodring av dessa, produktion av kapslar och inkapsling, deponering samt borrhålsförslutning. Den beräknade kostnaden är cirka 265 miljoner SEK per borrhål. Kostnaderna omfattar således inte den omfattande forskning och teknikutveckling som kommer att krävas innan ett slutförvar kan byggas och inte heller de kostnader som är förknippade med platsval och platskaraktärisering. Det är ett välkänt fenomen att denna typ av tidiga projektkostnads kalkyler oftast behöver justeras upp väsentligt vartefter projektet löper vidare.

7.3 Icke-tekniska projektrisker

I tiden utdragna projekt löper risken att samhälleliga 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 7-2 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.



Figur 7-2. Illustration av kritiska faktorer för samhällets förmåga att ta hand om det använda kärnbränslet.

8 Diskussion och slutsatser

Svensk lagstiftning och 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 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 samt planeringsförutsättningar i form av ledtider, utvecklingsbehov och kostnader.

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 förtutser en slutförvaring i kristallint berg medan man i Belgien, Frankrike och Schweiz riktar huvudintresset mot leror. I Tyskland har man historiskt sett bergsamt 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 stoppat planerna på att uppföra ett slutförvar vid Yucca Mountain har utredningar påbörjats rörande byggda förvar i salt, lerbergarter eller kristallina bergarter och som alternativ till detta djupa borrhål i kristallint berg. Transuraninnehållande låg- och medelaktivt avfall från det militära programmet slutförvaras i en anläggning i bergsamt i New Mexico.

I samband med prövningen av de av SKB inlämnade ansökningarna om tillstånd att uppföra ett slutförvar och en inkapslingsanläggning har Strålsäkerhetsmyndigheten i december 2013 formulerat ett antal frågeställningar som man vill ha närmare belysta för KBS-3 respektive deponering i djupa borrhål. En del av dessa frågeställningar belyses nedan.

Val av material för kapseln vid deponering i djupa borrhål

Den kapsel som föreslås i SNL:s referensutformning (Arnold et al. 2011) är gjord av kolstål. Kolstål kan förutses komma att korrodera med en hastighet på 10 µm per år eller mer i det varma och salta vatten som omger kapslarna. Korrosionen leder dels till godsfortunning och dels till utveckling av vätgas.

Som redovisats i avsnitt 5.3 förväntas godsfortunningen leda till att vissa kapslar kommer att ge vika för tyngden hos ovanpåliggande kapslar efter i storleksordningen något eller några hundratal år. Godsfortunning på grund av korrosion kommer även att medföra att kapslar kommer att bucklas av det hydrostatiska trycket i deponeringszonen. I tabell 8-1 redovisas korrosionshastigheter för några alternativa material. Flera av dessa material har betydligt bättre korrosionsbeständighet än kolstål.

Tabell 8-1. Sammanfattning av korrosionshastigheter för några potentiella kapselmaterial.

Legering	Korrosionshastighet ($\mu\text{m/y}$)*	Kommentar	Referens
Rostfritt stål, inklusive Ni-baserade legeringar såsom Alloy 825	0.01–1	Den höga salthalten och temperaturen kan resultera i relativt höga korrosionshastigheter. Den nedre delen av intervallet är tillämpligt för höjt pH i betongmiljö.	Blackwood et al. (2002), King och Watson (2010), Wada et al. (1999)
Legeringar med högt Ni-innehåll, t.ex. Hastelloys, Alloy 625	0.01	Korrosionsresistent pga. högt Cr-innehåll (upp till 23 wt. %) och tillsatser av W och/eller Co.	U.S. DOE (2008), Hua och Gordon (2004)
Ti-legeringar	0.01	Korrosionsresistenta pga. bildning av en passiv TiO_2 film.	U.S. DOE (2008), Hua och Gordon (2004)
Zr och liknande "ventilmaterial"	0.001–0.01	Korrosionsresistenta pga. bildning av en passiv ZrO_2 film.	Hansson (1985), Wada et al. (1999)
Kolstål	0.1–10	Den lägre delen av intervallet är applicerbar i alkaliska lösningar. Den övre intervallgränsen kan vara något högre i salt vatten vid 60–100 °C.	King och Stroes-Gascoyne (2000)

* 60–100 °C salt grundvatten

Dessa material är dock betydligt dyrare än kolstål. Användande av dessa material i kapslar för använt kärnbränsle måste föregås av noggrann utredning av materialets mekaniska och andra egenskaper, t.ex. tendenser till väteförspredning. Kopparkapslar förefaller mindre lämpliga vid deponering i djupa borrhål då den aktuella bufferten inte kan ge tillräckligt skydd mot aggressiva specier i det salta grundvattnet.

Val av ett kapslingsmaterial med lägre korrosionshastighet bidrar givetvis till att förlänga den period under vilka kapslarna förblir täta. Den största delen av gasutvecklingen på grund av stålkorrosion kommer dock från korrosion av foderrören. Det är knappast realistiskt att tänka sig foderrör av höggradiga legeringar av nickel eller titan eller foderrör av zirkonium. Möjligen skulle foderrör kunna göras av rostfritt stål. I den rådande miljön kommer dock även rostfritt stål att korrodera och ge upphov till vätegasbildning.

Funktionskrav för de olika barriärerna och barriärernas funktionsmässiga beroenden

Kravsituationen när det gäller barriärer i KBS-3-systemet är väl utvecklad och har redovisats i bland annat SR-Site (SKB 2011) med underlagsrapporter. I avsnitt 5.2.2 redovisas uppbyggnaden av det system av krav som ställs på förvarssystemets initialtillstånd samt de krav som ställs på förvarssystemets olika produktionslinjer för att säkerställa att det förutsagda initialtillståndet uppnås.

KBS-3-systemets långsiktiga säkerhet bygger på inneslutning i kopparkapseln som skyddas av bufferten vars egenskaper i sin tur skyddas av bergbarriärens egenskaper. Resultaten från SR-Site visar att i de osannolika fall som leder till att kapseln förlorar sin inneslutande förmåga så är den sekundära skyddsfunktionen, fördröjning, av begränsad betydelse. Detta beror dels på att de mekanismer som förväntas leda till kapselgenombrott också påverkar fördröjningen i de övriga barriärerna och dels på att dessa händelser förväntas uppkomma när endast långlivade radionuklider som inte påverkas nämnvärt av fördröjningen finns kvar i bränslet. Fördröjningen är dock av stor betydelse i det hypotetiska fallet att endast kapseln skadas med oförändrad funktion för övriga barriärer.

För djupa borrhål finns det ingen utvecklad kravbild på barriärerna. Grundfelt och Wiborgh (2006) redovisar en ansats att utveckla krav för den utformning av ett förvar i djupa borrhål som föreslås i Pass-studien (SKB 1992) från den kravbild som då hade börjat utvecklas för KBS-3-systemet. Dessa delsystemkrav sammanfattas i tabell 8-2. Den beskrivning av en trolig utveckling av ett förvar i djupa borrhål som redovisas i avsnitt 5.4.3 visar att flera av delsystemkraven i tabellen knappast uppfylls av den utformning av ett förvar i djupa borrhål som ligger till grund för bedömningarna i denna rapport. Detta gäller särskilt delsystemkraven på bufferten och kraven på att de olika delsystemen ska kunna kontrolleras mot specificerade acceptanskriterier. Om ett förvar i djupa borrhål skulle utvecklas i Sverige skulle sannolikt kravbilderna få justeras till något som är uppnåbart.

Tabell 8-2. Delsystemkrav vid deponering i djupa borrhål.

Delsystem	Delsystemet ska:
Kapsel	<ul style="list-style-type: none">• vara tät vid deponering och helt innesluta det använda kärnbränslet• motstå de mekaniska belastningarna vid deponering• ha försumbar inverkan på de övriga barriärernas säkerhetsfunktioner• kunna hanteras och deponeras på ett säkert sätt• kunna tillverkas med hög tillförlitlighet enligt specifikation• kunna kontrolleras mot specificerade acceptanskriterier
Buffert	<ul style="list-style-type: none">• ha så låg hydraulisk konduktivitet att den advektiva¹ transporten är låg• hålla kapseln centrerad i borrhålet• ha försumbar påverkan på de övriga barriärernas säkerhetsfunktioner• kunna upprätthålla sina säkerhetsfunktioner under lång tid• kunna installeras enligt specifikation med hög tillförlitlighet• kunna kontrolleras mot specificerade acceptanskriterier
Infodring	<ul style="list-style-type: none">• motverka bergutfall och håldeformation• medge säker deponering av kapsel och buffert• tillåta expansion av bufferten så att den får kontakt med berget• inte signifikant påverka bergets och de övriga barriärernas säkerhetsfunktioner• kunna installeras med hög tillförlitlighet enligt specifikation• kunna kontrolleras mot specificerade acceptanskriterier
Förslutning	<ul style="list-style-type: none">• förhindra intrång• begränsa advektiv transport¹ i borrhålet• vara långsiktigt beständig• inte signifikant påverka barriärernas säkerhetsfunktioner• kunna installeras enligt specifikation med hög tillförlitlighet• kunna kontrolleras mot specificerade acceptanskriterier
Borrhål	<ul style="list-style-type: none">• medge att kapsel och buffert som uppfyller säkerhetskraven kan deponeras• medge att förslutning som uppfyller säkerhetskraven kan installeras• inte signifikant påverka bergets och de övriga barriärernas säkerhetsfunktioner• med hög tillförlitlighet kunna borrar enligt specifikation• kunna kontrolleras enligt specificerade acceptanskriterier
Berget	<ul style="list-style-type: none">• isolera slutförvaret från biosfären• fördröja radionuklidtransporten till biosfären

¹ Advektiv transport = transport av ett ämne eller konstant egenskap med en vätska eller gas som förflyttas (Wikipedia).

Den helt dominerande säkerhetsfunktionen vid deponering i djupa borrhål är den långsamma vattenomsättningen i deponeringszonen som i sin tur beror på den densitetsskiktning som uppstår på grund av det saltare djupa grundvattnet. Denna säkerhetsfunktion är inte beroende av övriga barriärer men kan potentiellt försämrats på grund av värmeutveckling på grund av bränslets resteffekt och bildning av vätgas ifrån korrosion av kapslar och foderrör.

Tilltron till barriärerna

Tilltron till KBS-3-barriärernas säkerhetsfunktioner har utvecklats under lång tid och grundas på ett allsidigt forskningsprogram som omfattat både materialegenskaper och arbetsmetoder. Säkerhetsfunktionerna har utmanats i ett flertal säkerhetsanalyser där SR-Site är den senaste.

I avsnitt 5.4.1 visas att närzonen i ett förvar i djupa borrhål inte kan förutses bidra signifikant till den långsiktiga säkerheten. Berget blir då den enda barriären som ger ett långsiktigt skydd. Mycket tyder på att den densitetsskiktning som är bergbarriärens huvudsakliga säkerhetsfunktion är vanligt förekommande och att övergångszonen mellan sött och salt grundvatten i flacka områden ligger någonstans mellan knappt 1 000 m och 1 500 m djup. Vissa data tyder på att signifikanta salthaltsvariationer förekommer inom den salta grundvattenzonen.

Även om flera författare anger att det salta vattnet troligen bildats genom växelverkan mellan gammalt meteoriskt vatten och bergmineraler och att det inte har haft kontakt med ytligare system på flera miljoner år så finns det idag stora kunskapsluckor (Tsang och Niemi 2013). För att fylla dessa kunskapsluckor behöver man sannolikt utveckla nya undersöknings- och utvärderingsmetoder eftersom det stora djupet medför komplikationer.

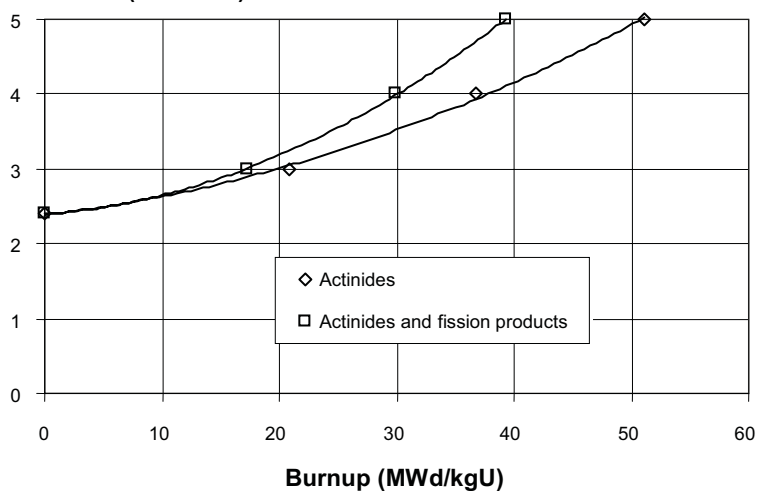
Analys av risken för kriticitet

Skulle vatten komma in i kapseln så är KBS-3-kapseln mer reaktiv än kapseln för deponering i djupa borrhål. I det fall vatten tränger in i en KBS-3-kapsel med obestratat bränsle med en initial anrikning som överstiger 2,4 % får man räkna med att kriticitet kan uppstå. Risken för detta minskar givetvis med ökad utbränning. I figur 8-1 visas kriticitetsrisken vid vatteninträngning i en KBS-3-kapsel som funktion av initial anrikning och utbränning. Bränsle som har en kombination av initial anrikning och utbränning som ligger under kurvan kan inte bli kritiskt medan förutsättningar finns för kriticitet för bränsle som ligger över kurvan. Förutsättningen för att kriticitet ska uppstå i det senare fallet är dock att vatten finns tillgängligt och att geometrin är sådan att kriticitet kan uppstå.

I säkerhetsanalysen för driftskedet (SKBdoc 1091141) visas att inga händelser av händelseklass H3-H4 leder till en sådan kapselskada att kapseln kan vattenfyllas. I SR-Site (SKB 2011) görs bedömningen att sannolikheten för kriticitet i slutförvaret är försumbar. I en skrivelse till SSM (SKBdoc 1417733) visas att konsekvenserna av det oralistiska fallet att kriticitet skulle uppstå i ett KBS-3-förvar är begränsade.

I slutförvaret förväntas KBS-3-kapseln förbli tät under mycket lång tid. Detta medför att kriticitetsrisken i ett KBS-3-förvar är mycket liten. Detta förstärks ytterligare av att den andel av bränslet i förvaret som ligger över kurvan i figur 8-1 är liten.

Initial enrichment (% U -235)



Figur 8-1. Samband mellan initial anrikning, och utbränning samt kriticitetsrisk. I området över kurvan kan systemet bli kritiskt medan kriticitet är uteslutet under kurvan.

Kriticitetsrisken vid deponering i djupa borrhål har belysts i avsnitt 5.3.4. Genom att kapselgenombrotten kan förväntas ge en väsentligt förändrad geometri samtidigt som det inte kan helt uteslutas att borrhålet spolas rent från borrhålsmud kan man inte utesluta att kriticitet uppstår. Det är idag mycket svårt att bedöma sannolikheten för ett sådant fall. Ingen konsekvensanalys har genomförts för ett sådant fall.

Motsättningen – oåtkomligt mot att kunna åtgärda

Under deponeringsfasen är hanteringen av bränslet i ett KBS-3-förvar helt reversibel. Metoder att återta kapslar för att sätta systemet i ett säkert läge i enlighet med kraven i 2 kap 2 § SSMFS 2008:1 har utvecklats och testats i Äspölaboratoriet. Efter förslutningen av KBS-3-förvaret ska inga mänskliga ingrepp behövas. Principiellt är det dock möjligt att ta sig ner i anläggningen för att återta bränslet. Kapslarnas förväntade täthet medför att risken för att man ska träffa på material som är kontaminerat av radioaktivitet från det deponerade bränslet måste bedömas som liten. Naturligtvis är ett sådant projekt mycket omfattande och kostnadskrävande. Det är sannolikt inte möjligt att otillbörligen genomföra i ett ordnat samhälle.

Vid deponering i djupa borrhål ligger bränslet på större djup. Bränslet är omslutet av kapslar vars täthet, åtminstone efter en tid, kan ifrågasättas. Kapselsträngarna är dessutom separerade av betongproppar som måste penetreras för att man ska kunna hämta upp underliggande kapslar. Allt detta gör att återtag, både behörigt och obehörigt, måste anses som mycket svårt, om inte omöjligt, och förenat med radiologiska risker på grund av kontaminering av borrhålsvätska, kapslar och redskap.

Markanvändningsrestriktioner

Under slutförvarens driftperiod då utbyggnad och deponering pågår parallellt under drygt 50 år finns följande skillnader i behoven av restriktioner för hur förvarsområdet kan användas: För KBS-3 är det endast det relativt begränsade området med själva ovanmarksanläggningen samt eventuella ventilationsbyggnader (totalt ca 0,2 km²), där förbindelse finns mellan ytan och deponeringsområdet, som behöver inhägnas och inte kan användas för andra ändamål. För djupa borrhål får man räkna med att hela deponeringsområdet med ovanmarksanläggningen och de 80 borrhålen (totalt ca 1 km²) kommer att behöva inhägnas och undantas från annan användning.

Efter förslutning kan markområdena ovanför såväl KBS-3-förvar som ett förvar i djupa borrhål återställas och användas på normalt sätt för de flesta andra ändamål. Restriktioner för borning och undermarksarbeten kan dock vara på sin plats. Eftersom ett förvar i djupa borrhål ligger på större djup är sannolikheten för att ett sådant förvar ska beröras av framtida undermarksarbeten lägre än för ett KBS-3-förvar. Emellertid kan man förvänta sig att radionukliderna i ett KBS-3-förvar under mycket lång tid kommer att vara inneslutna i sina kapslar medan det inom några sekler kan utvecklas områden runt de deponerade kapslarna med kontaminerat grundvatten kring ett förvar i djupa borrhål, se figur 5-6. Ett förvar i djupa borrhål innebär dessutom 80 st återfyllda av människan skapade potentiella förbindelsekanaler mellan deponeringsområde och markyta spridda över hela förvarsområdet medan det för ett KBS-3 förvar endast handlar om 4–5 st sådana förbindelser (ramp, schakt och ventilationsförbindelser). Ett förvar i djupa borrhål innehåller dessutom dessa potentiella förbindelsekanaler kapslar med avfall vilket inte är fallet i KBS-3 förvaret. Konsekvenserna av ett intrång i ett förvar i djupa borrhål kan därför vara större än vid motsvarande intrång i ett KBS-3-förvar. Det är värt att påpeka att de geotermiska kraftverk som byggs i Tyskland och Frankrike bygger på borrhål som är 4–5 km djupa och att utvinning av naturresurser på några tusen meters djup förekommer redan idag på andra håll i världen. Det kan således komma att finnas anledningar till djupa borringar i en framtid även i vår del av världen.

Referenser

Publikationer utgivna av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) kan hämtas på www.skb.se/publikationer. Referenser till SKB:s opublicerade dokument finns samlade i slutet av referenslistan. Opublishade dokument lämnas ut vid förfrågan till dokument@skb.se

Ahonen L, Kietäväinen R, Kortelainen N, Kukkonen IT, Pullinen A, Toppi T, Bomberg M, Itävaara M, Nousiainen A, Nyysönen M, Öster M, 2011. Hydrogeological characteristics of the Outokumpu Deep Drill Hole. Geological Survey of Finland, Special Paper 51, 151–168.

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.

Arnold B W, Brady P V, Bauer S J, Herrick C, Pye S, Finger J, 2011. Reference design and operations for deep borehole disposal of high level radioactive waste. SAND2011-6749, Sandia National Laboratories, New Mexico.

Arnold B W, Vaughn P, MacKinnon R, Tillman J, Nielson D, Brady P, Halsey W, Altman S, 2012. Research, development and demonstration roadmap for deep borehole disposal. FCRD-USED-212-000269, SAND2012-8527P, Sandia National Laboratories, New Mexico.

Arnold B W, Brady P, Altman S, Vaughn P, Nielson D, Lee J, Gibb F, Mariner P, Travis K, Hasey W, Bewick J, Tillman J, 2013. Deep borehole disposal research: demonstration site selection guidelines, borehole seals design and RD&D needs. FCRD-USED-2013-000409, SAND2013-9490P, Sandia National Laboratories, New Mexico.

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.

Beswick J, 2008. Status of technology for deep borehole disposal. Report for the UK Nuclear Decommissioning Authority.

Beswick A J, Gibb F G F, Travis K P, 2014. Deep borehole disposal of nuclear waste: engineering challenges. Proceedings of the ICE – Energy 167, 47–66.

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.

Blackwood D J, Gould L J, Naish C C, Porter F M, Rance A P, Sharland S M, Smart N R, Thomas M I, Yates T. 2002. The localised corrosion of carbon steel and stainless steel in simulated repository environments. AEAT/ERRA 0318, AEA Technology.

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 20, 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.

- Clayton D, Freeze G, Hadgu T, Hardin E, Lee J, Prouty J, Rogers R, Nutt W M, Birkholzer J, Liu H H, Zheng L, Chu S, 2011.** Generic disposal system modeling – fiscal year 2011 progress report. FCRD-USED-2011-000184, SAND2011-5828P, Sandia National Laboratories, New Mexico.
- Gibb F G F, McTaggart N A, Travis K P, Burley D, Hesketh K W, 2008.** High density support matrices: key to deep borehole disposal of spent nuclear fuel. *Journal of Nuclear Materials* 374, 370–377.
- Grundfelt B, 2010.** Jämförelse mellan KBS-3-metoden och deponering i djupa borrhål för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle. SKB R-10-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Grundfelt B, 2013.** Radiological consequences of accidents during disposal of spent nuclear fuel in a deep borehole. SKB P-13-13, 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.
- Grundfelt B, Crawford J, 2014.** The deep borehole concept. A conceptual model for gas generation and gas transport. SKB P-13-11, 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 to the Director General of the International Atomic Energy Agency. Wien: International Atomic Energy Agency.
- Hansson C M, 1985.** The corrosion of steel and zirconium in anaerobic concrete. I Werme L O (red). Scientific basis for nuclear waste management IX: symposium held in Stockholm, Sweden, 9–11 September 1985. Pittsburgh, PA: Materials Research Society. (Materials Research Society Symposium Proceedings 50)
- Harrison T, 2000.** Very deep borehole. Deutag's opinion on boring, canister emplacement and retrievability. SKB R-00-35, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Herrick C B, Arnold B W, Hadgu T, Finley R, Vaughn P, Brady P, 2011.** Deep borehole seals. Sandia National Laboratories, New Mexico.
- Hoag C I, 2006.** Canister design for deep borehole disposal of nuclear waste. Master thesis. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
- Hua F, Gordon G, 2004.** Corrosion behaviour of Alloy 22 and Ti Grade 7 in a nuclear waste repository environment. *Corrosion* 60, 764–777.
- Jaquet O, Siegel P, 2003.** Groundwater flow and transport modelling during a glaciation period. SKB R-03-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Jaquet O, Siegel P, 2006.** Regional ground water flow for a glaciation scenario. Simpevarp subarea – version 1.2. SKB R-06-100, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 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, Smellie J, Eliasson T, Ljunggren C, Leijon B, Beswick J, 1998.** Very Deep hole concept: Geoscientific appraisal of conditions at great depth. SKB TR 98-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- King F, Stroes-Gascoyne S. 2000.** An assessment of the long-term corrosion behaviour of C-steel and the impact on the redox conditions inside a nuclear fuel waste disposal container. Report 06819-REP-01200-10028. Ontario Power Generation, Nuclear Waste Management Division, Canada.
- King F, Watson S, 2010.** Review of the corrosion performance of selected metals as canister materials for UK spent fuel and/or HLW. Report QRS-1384J-1 Version 2.1, Quintessa Ltd., UK.
- Lee J H, Arnold B W, Swift P N, Hadgu T, Freeze G, Wang Y, 2012.** A prototype performance assessment model for generic deep borehole repository for high-level nuclear waste. I Proceedings of WM2012 Conference, Phoenix, Arizona, 26 February – 1 March 2012. Available at: <http://www.wmsym.org/archives/2012/papers/12132.pdf>

- Marsic N, Grundfelt B, 2013a.** Modelling of thermally driven groundwater flow in a facility for disposal of spent nuclear fuel in deep boreholes. SKB P-13-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Marsic N, Grundfelt B, 2013b.** Review of geoscientific data of relevance to disposal of spent nuclear fuel in deep boreholes in crystalline rock. SKB P-13-12, 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, Ma: 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 från Statens råd för kärnavfallsfrågor, Miljödepartementet, 32–35.
- Odén A, 2013.** Förutsättningar för borrhållning av och deponering i djupa borrhål. SKB P-13-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 1992.** Project on Alternative Systems Study (PASS). Final report. SKB TR 93-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2000.** Förvarialternativet djupa borrhål. Innehåll och omfattning av FUD-program som krävs för jämförelse med KBS-3-metoden. SKB R-00-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2007a.** 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, 2007b.** Plan 2007. Kostnader för kärnkraftens radioaktiva restprodukter. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2008.** Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase. SDM-Site Forsmark. SKB TR-08-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2009.** Slutförvarsanläggning för använt kärnbränsle. Anläggningsbeskrivning layout D – Forsmark. SKB R-09-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2010a.** Teknisk beskrivning – mellanlagring, inkapsling och slutförvaring av använt kärnbränsle. SKB R-10-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2010b.** Fud-program 2010. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2010c.** Design and production of the KBS-3 repository. SKB TR-10-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2010d.** Spent nuclear fuel for disposal in the KBS-3 repository. SKB TR-10-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2010e.** Design, production and initial state of the canister. SKB TR-10-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2010f.** Design, production and initial state of the buffer. SKB TR-10-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2010g.** Design, production and initial state of the backfill and plug in deposition tunnels. SKB TR-10-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2010h.** Design, production and initial state of the closure. SKB TR-10-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2010i.** Design, construction and initial state of the underground openings. SKB TR-10-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2010j.** FEP report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-45, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- SKB, 2011.** Redovisning av säkerhet efter förslutning av slutförvaret för använt kärnbränsle. Huvudrapport från projekt SR-Site. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2013a.** Fud-program 2013. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2013b.** Plan 2013. Kostnader från och med år 2015 för kärnkraftens radioaktiva restprodukter. Underlag för avgifter och säkerheter åren 2015–2017. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2013c.** Äspö Hard Rock Laboratory. Annual report 2012. SKB TR-13-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Smellie J, 2004.** Recent geoscientific information relating to deep crustal studies. SKB R-04-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SSMFS 2008:1.** Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om säkerhet i kärntekniska anläggningar. Stockholm: Strålsäkerhetsmyndigheten.
- SSMFS 2008:3.** Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om kontroll av kärnämne m m. Stockholm: Strålsäkerhetsmyndigheten.
- SSMFS 2008:12.** Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om fysiskt skydd av kärntekniska anläggningar. Stockholm: Strålsäkerhetsmyndigheten.
- SSMFS 2008:27.** Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om verksamhet med acceleratörer och slutna strålkällor. Stockholm: Strålsäkerhetsmyndigheten.
- SSMFS 2008:31.** Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om röntgendiagnostik. Stockholm: Strålsäkerhetsmyndigheten.
- Tsang C-F, Niemi A, 2013.** Deep hydrogeology: a discussion of issues and research needs. Hydrogeology Journal 21, 1687–1690.
- Tsang C-F, Niemi A, Larsson M (red), 2012.** Proceedings of deep hydrogeology workshop, Uppsala University, Sweden, 20–22 September 2011. Institutionen för goevetenskaper, Uppsala Universitet.
- U.S. AEC, 1974.** High-level radioactive waste management alternatives. Washington, DC: U.S. Atomic Energy Commission.
- U.S. DOE, 2008.** Yucca Mountain Repository license application. DOE/RW-0573, U.S. Department of Energy.
- U.S. DOE, 2014.** Evaluation of options for permanent geologic disposal of spent nuclear fuel and high-level radioactive waste in support of a comprehensive national nuclear fuel cycle strategy. FCRD-UFD-2013-000371 (rev. 1), SAND2014-0187P (Vol. I) och SAND2014-0189P (Vol. II). Sandia National Laboratories, New Mexico.
- 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.
- Wada R, Nishimura T, Fujiwara K, Tanabe M, Mihara M, 1999.** Experimental study of hydrogen gas generation rate from corrosion of Zircaloy and stainless steel under anaerobic alkaline condition. I Proceedings of 7th International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, ICEM'99, Nagoya, Japan, 26–30 September 1999.
- Woodward-Clyde Consultants, 1983.** Very deep hole systems engineering studies. Springfield, VA: National Technical Information Service.
- 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, Göteborg.

Opublicerade dokument.

SKBdoc id, version	Titel	Utfärdare, år
1091141 ver 3.0	Säkerhetsredovisning för drift av slutförvaringsanläggning för använt kärnbränsle (SR-Drift) kapitel 8 - Säkerhetsanalys	SKB, 2010
1193244 ver 4.0	Critically safety calculations of disposal canisters	SKB, 2010
1417733 ver 1.0	Svar till SSM på begäran om komplettering rörande kriticitet	SKB, 2013

Sammanställning av rapporter som belyser djupa borrhål

- U.S. AEC, 1974.** High-level radioactive waste management alternatives. Washington, DC: U.S. Atomic Energy Commission.
- 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.** Project on Alternative Systems Study (PASS). Final report. SKB TR 93-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Juhlin C, Wallroth T, Smellie J, Eliasson T, Ljunggren C, Leijon B, Beswick J, 1998.** Very Deep hole concept: Geoscientific appraisal of conditions at great depth. SKB TR 98-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ekendahl A-M, Papp T, 1998.** Alternativa metoder. Långsiktigt omhändertagande av kärnavfall. SKB R-98-11, 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.
- 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.** Systemanalys. Val av strategi och metod för omhändertagande av använt kärnbränsle. SKB R-00-32, 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, Ma: 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 20, 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.
- Hoag C I, 2006.** Canister design for deep borehole disposal of nuclear waste. Master thesis. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
- Grundfelt B, Wiborgh M, 2006.** Djupa borrhål – Status och analys av konsekvenserna vid användning i Sverige. SKB R-06-58, 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.
- CoRWM, 2006.** Managing our radioactive waste safely – CoRWM's recommendations to Government. CoRWM Doc 700, Committee on Radioactive Waste Management, UK.
- 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, Göteborg.
- KASAM, 2007.** Djupa borrhål: ett alternativ för slutförvaring av använt kärnbränsle? (Rapport från KASAM:s utfrågning den 14–15 mars 2007, tillika en fördjupning till KASAM:s rapport om kunskapsläget på kärnavfallsområdet 2007, Rapport 2007:6 från 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.

Tillgänglig: http://www.karnavfallsradet.se/sites/default/files/Leif_Bjelm.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 the UK Nuclear Decommissioning Authority.

Jackson D P, Dormuth K W, 2008. Watching brief on reprocessing, portioning and transportation and alternative waste management technology – Annual report 2008. NWMO TR-2008-32, Nuclear Waste Management Organization, Kanada.

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.

Grundfelt B, 2010. Jämförelse mellan KBS-3-metoden och deponering i djupa borrhål för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle. SKB R-10-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Arnold B W, Brady P V, Bauer S J, Herrick C, Pye S, Finger J, 2011. Reference design and operations for deep borehole disposal of high level radioactive waste. SAND2011-6749, Sandia National Laboratories, New Mexico.

Arnold B W, Vaughn P, MacKinnon R, Tillman J, Nielson D, Brady P, Halsey W, Altman S, 2012. Research, development and demonstration roadmap for deep borehole disposal. FCRD-USED-212-000269, SAND2012-8527P, Sandia National Laboratories, New Mexico.

Odén A, 2013. Förutsättningar för borrhållning av och deponering i djupa borrhål. SKB P-13-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Marsic N, Grundfelt B, 2013. Modelling of thermally driven groundwater flow in a facility for disposal of spent nuclear fuel in deep boreholes. SKB P-13-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Marsic N, Grundfelt B, 2013. Review of geoscientific data of relevance to disposal of spent nuclear fuel in deep boreholes in crystalline rock. SKB P-13-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Grundfelt B, 2013. Radiological consequences of accidents during disposal of spent nuclear fuel in a deep borehole. SKB P-13-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Arnold B W, Brady P, Altman S, Vaughn P, Nielson D, Lee J, Gibb F, Mariner P, Travis K, Halsey W, Bewick J, Tillman J, 2013. Deep borehole disposal research: demonstration site selection guidelines, borehole seals design and RD&D needs. FCRD-USED-2013-000409, SAND2013-9490P, Sandia National Laboratories, New Mexico.

Freeze G, Voegele M, Vaughn P, Prouty J, Nutt W M, Hardin E, Sevougian S D, 2013. Generic deep geologic disposal safety case. FCRD-UFD-000146, SAND2013-0974P, Sandia National Laboratories, New Mexico.