

R-06-58

Djupa borrhål – Status och analys av konsekvenserna vid användning i Sverige

Bertil Grundfelt, Marie Wiborgh
Kemakta Konsult AB

September 2006

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co
Box 5864
SE-102 40 Stockholm Sweden
Tel 08-459 84 00
+46 8 459 84 00
Fax 08-661 57 19
+46 8 661 57 19



ISSN 1402-3091

SKB Rapport R-06-58

Djupa borrhål – Status och analys av konsekvenserna vid användning i Sverige

Bertil Grundfelt, Marie Wiborgh
Kemakta Konsult AB

September 2006

Denna rapport har gjorts på uppdrag av SKB. Slutsatser och framförda åsikter i rapporten är författarnas egna och behöver nödvändigtvis inte sammanfalla med SKB:s.

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

Sammanfattning

I den här rapporten görs en genomgång av konceptet djupa borrhål som omfattar tänkbar utformning, förutsättningarna för bygge och drift samt en modellstudie av grundvattenförhållandena på stora djup. Baserat på detta genomförs en diskussion om konceptets förutsättningar för att uppfylla SKB:s grundläggande krav på ett slutförvarssystem med avseende på byggbarhet, driftsäkerhet, långsiktig säkerhet samt kvalitetssäkring av förvarsdelarnas egenskaper och funktion. På grund av att kunskapen om de geovetenskapliga förhållandena på stora djup liksom om teknik för bygge och drift är begränsade har ingen analys av ingenjörbarriärernas utveckling och konsekvenserna av eventuella utläckage av radionuklider genomförts. I en tidigare utredning har SKB konstaterat att det krävs 30 års forskning och utveckling med en kostnad på cirka fyra miljarder kronor för att föra kunskapen om djupa borrhål till samma nivå som dagens kunskap om KBS-3-konceptet.

SKB utredde inom Pass-studien i slutet av 1980-talet och början av 1990-talet olika slutförvarskoncept, där djupa borrhål var ett. Det utformningsförslag som då togs fram har legat till grund för diskussioner om djupa borrhål i flera andra länder och har tagits som grund även för denna studie. Ett förvar i djupa borrhål består av flera borrhål som är cirka 4 000 meter djupa. Kapslar med använt kärnbränsle deponeras på 2 000 till 4 000 meters djup i borrhålen där grundvattnet i princip kan förväntas att vara stillastående under mycket lång tid.

I en tidigare utredning om vilken teknik som kan eller bör användas för att framställa ett hål för deponering av använt kärnbränsle konstateras, att den enda teknik som ger en rimlig sjunkhastighet vid borrhålning i kristallint berg är hammarborrning. Det finns idag ingen utvecklad utrustning för hammarborrning av tillräckligt vida och djupa hål. I utredningen konstateras att traditionella borrhålsborrningsmetoder sannolikt inte fungerar utan det rekommenderas att ett styvt skum som binder borrhålsborrningsvätskan används. I utredningen konstateras avslutningsvis att det sannolikt går att framställa de djupa borrhålen med känd teknik, men att det kommer att utgöra borrhålsindustrins hittills tuffaste utmaning.

Baserat på den lösning som föreslogs i Pass-studien krävs 45 borrhål för att rymma det använda bränslet från det svenska kärnkraftsprogrammet under antagandet att reaktorerna körs i 40 år. Varje borrhål kräver en anlagd arbetsyta på cirka en hektar. På denna arbetsyta ska rymmas en 60–80 meter hög borrhålsborrning samt de byggnader som krävs för att borra, hantera och avvattna borrhålsborrningsvätskan, kläda in borrhålet med foderrör, deponera det använda bränslet samt försluta borrhålet efter deponeringen. Avståndet mellan borrhålen har satts till 500 meter för att undvika att snett borrhålsborrade hål kommer för nära varandra. Om mark- och bergförhållandena tillåter detta kan slutförvaret rymmas inom en yta av cirka 10 km². Inom denna studie har det uppskattats att 5–10 borrhålsborrplatser behöver vara i drift, eller under anläggande, samtidigt med en deponeringstid anpassad till det svenska kärnkraftsprogrammet.

Den tillgängliga informationen om de geovetenskapliga förhållandena på stora djup i kristallint berg baseras på ett fåtal borrhål varav inget ligger inom något område som idag är aktuellt för slutförvaring av kärnkraftsavfall. Vattenomsättningen på detta djup antas vara låg och salthalten i grundvattnet liksom grundvattnets temperatur och bergspänningarna förväntas öka med djupet.

Det finns idag ingen etablerad eller ens väl genomtänkt teknik för deponering av kapslar med använt bränsle i djupa hål. I de förslag till tänkbara lösningar som tagits fram genomförs deponeringen med något verktyg anslutet till borrhålsborrningen och kapslarna trycks ner genom borrhålsborrningsvätskan och en deponeringsslurry som har fått förtränga borrhålsborrningsvätskan i den nedre delen av borrhålet. Teknik för att verifiera att kapslarna är täta och vilka egenskaper bufferten runt kapslarna har efter deponering finns ej. Det i kombination med de förhållanden som kan förväntas i borrhålet på stort djup innebär att det blir svårt att visa att kapsel och buffert med önskade egenskaper kan deponeras. Detta innebär att det idag inte är möjligt att med någon trovärdighet bedöma och kvantifiera kapseln och buffertens barriärfunktioner.

Säkerheten i djupa hål baseras huvudsakligen på de mer eller mindre stagnanta grundvattenförhållanden man förväntar sig att finna på stort djup i kristallint berg. Inom denna studie har grundvattenströmningsberäkningar genomförts för en generisk modelldomän. Dessa beräkningar visar att den beräknade grundvattentransporttiden från förvarsdjup till ytan kan vara mycket lång. Transporttiden är känslig för vissa antaganden såsom borrhålets initiala innehåll av sötvatten samt buffertens och förslutningens kvalitet i borrhålet. Resultaten från modellstudien kan betraktas som indikativa och kvantitativa slutsatser är mycket osäkra.

Slutsatsen från denna studie är att förhållandena som kan förväntas på stort djup i den svenska berggrunden gör djupa hål till både ett intressant och svår genomförbart alternativ. De säkerhetsfördelar de antagna stagnanta grundvattenförhållandena kan förväntas medföra är dock svåra att visa med den säkerhet som krävs för slutlig förvaring av använt kärnbränsle.

Summary

In this report a review of the Very Deep Hole, VDH, concept is presented. The review includes possible repository design, the prerequisites for construction and operation, and a model study of the groundwater conditions at great depths. Based on this, the possibility of the concept to fulfil SKB's basic requirements on a repository system regarding constructability, operational safety, long-term safety and quality assurance of the properties and performance of the different parts of the repository is discussed. Because the knowledge of the geoscientific conditions at great depths as well as of the technology needed for construction and operation of a repository is limited, no analysis has been carried out of the time evolution of the properties of the engineered barriers. Neither has possible release and migration of radionuclides been analysed. In an earlier study, SKB estimated that bringing the knowledge about the VDH concept to the same level as the current knowledge of the KBS-3-concept would require a 30 years R&D programme costing in the order of four billions SEK.

Within the Pass-study at the end of the 1980-ies and beginning of 1990-ies SKB investigated different repository concepts, one of which was the VDH-concept. The design proposals that were developed then have formed the basis for discussions about the VDH-concept in several other countries and have been used as a basis also for the present study. A VDH repository consists of about 4,000 metres deep boreholes. Canisters containing spent nuclear fuel are emplaced between 2,000 and 4,000 metres depth in the boreholes where the groundwater in principle is expected to be stagnant for very long time periods.

An earlier study on the choice of technology for producing the boreholes for disposal of spent nuclear fuel concludes that the only technology that gives a reasonable drilling speed in crystalline rock is percussion drilling. Today there is no available equipment for percussion drilling of sufficiently wide and deep holes. The investigation also concludes that traditional drilling fluids probably cannot be used. It is recommended that stiff foam that binds the cuttings should be used instead. The bottom line of the study is that it is probable that existing technology can be used to produce the deposition holes but that this will be the greatest challenge the drilling industry has been exposed to.

Based on the design solution proposed in the Pass-study, 45 holes are required for the disposal of the spent fuel from 40 years operation of the Swedish nuclear reactors. Each borehole will require a surface facility of about 1 ha. This area would host a 60–80 metres tall drilling rig together with the buildings and facilities needed for drilling, handling and dewatering of drill cuttings, casing of the hole, disposal of the spent fuel and sealing the hole after the disposal. The distance between the holes has been set to 500 metres, in order to avoid that holes deviating from the vertical direction come too close to each other. If the conditions on the ground and geological conditions allow, the repository can be hosted within a surface area of about 10 km². Within the present study, it has been estimated that 5–10 drilling sites need to be in operation for disposal or under construction simultaneously, in order to achieve a disposal time that is adapted to the Swedish nuclear programme.

The available information about the geoscientific conditions at great depths in crystalline rock is based on only few boreholes, none of which are located in an area that would be a candidate repository site. The water turnover at these great depths is generally assumed to be low whereas the groundwater salinity, temperatures and rock stresses are expected to increase with an increasing depth.

Today there is no established or even well thought-out technology for disposal of canisters with spent nuclear fuel in deep boreholes. In the proposed possible solutions the disposal is carried out with a tool connected to the drilling rig. The canisters are pushed down through the drilling fluid in the borehole. In the lower part of the hole, deposition slurry has been brought

to displacing the drilling fluid. In this part of the hole the canisters will be pushed through the deposition slurry. There is no available technology for to verify that the canisters remain tight and that the properties of the buffer surrounding the canisters are those wanted or expected. This in combination with the conditions expected at great depth in the borehole means that it will be difficult to show that the deposited canister and the buffer have the desired properties. Hence, it is not possible today to make credible quantitative estimates of the barrier performance of the canister and the buffer.

The safety of the VDH concept is principally based on the more or less stagnant groundwater conditions expected at great depth in crystalline rock. Groundwater modelling has been performed within this study based on a generic model domain. The results of these calculations show that the calculated groundwater travel time from the repository depth to the surface can be very long. The transport time is sensitive to certain assumptions such as the initial content of fresh water in the borehole and the quality of the buffer and sealing in the borehole. The results from the modelling exercise should be regarded as indicative while quantitative conclusions remain very uncertain.

The conclusion of this study is that the conditions expected at great depth in the Swedish basement rock make the VDH concept an interesting alternative as well as one that is difficult to implement. The safety advantages provided by the assumed stagnant groundwater conditions are difficult to demonstrate with the certainty required for disposal of spent nuclear fuel.

Innehåll

1	Inledning	8
1.1	Bakgrund	8
1.2	Tidigare arbeten	8
1.3	Säkerhetsfilosofi	9
1.4	Syfte och avgränsningar	11
2	Definition och funktion av djupa borrhål	13
3	Beskrivning av konceptet djupa borrhål	17
3.1	Inledning	17
3.2	Geologisk barriär	18
3.2.1	Den geologiska barriärens funktion	18
3.2.2	Förhållanden på stora djup	19
3.2.3	Konceptuell geologisk modell	20
3.3	Borrhål	21
3.3.1	Definition och funktion	21
3.3.2	Delsystemkrav	21
3.3.3	Alternativa utformningar – deponeringsområde	22
3.3.4	Alternativa utformningar – förslutningsområde	22
3.3.5	Störd zon	22
3.4	Infodring	24
3.4.1	Definition och funktion	24
3.4.2	Delsystemkrav	24
3.4.3	Alternativa utformningar	24
3.5	Buffert	25
3.5.1	Definition och funktion	25
3.5.2	Delsystemkrav	25
3.5.3	Alternativa utformningar	26
3.6	Kapsel	26
3.6.1	Definition och funktion	26
3.6.2	Delsystemkrav	26
3.6.3	Alternativa kapselutformningar	28
3.7	Förslutning	30
3.7.1	Definition och funktion	30
3.7.2	Delsystemkrav	30
3.7.3	Alternativa utformningar	30
4	Förutsättningar för byggnation och drift	33
5	Förutsättningar för bedömning av långsiktig säkerhet	37
5.1	Den geologiska barriärens isolerande och fördröjande förmåga	37
5.2	Förslutningen	37
5.3	Buffert	38
5.4	Infodring	38
5.5	Kapsel	39
5.6	Modellstudie av den geologiska barriärens isolerande förmåga	40
6	Förutsättningar för kravuppfyllnad	47
7	Slutsatser	51
8	Referenser	53

1 Inledning

1.1 Bakgrund

I enlighet med miljöbalken ska en miljökonsekvensbeskrivning bland annat innehålla en alternativredovisning och motivering till valt alternativ. I samråden och i diskussioner med SSI har det framkommit önskemål om att redovisningen av alternativa metoder för slutförvaring av använt kärnbränsle bör fördjupas. Särskilt bör metoden djupa borrhål ges en mer ingående belysning. Ett motiv till det är att jämföra KBS-3-slutförvaret där säkerheten baseras på flera ingenjörbarriärer i kombination med en geologiska barriär med ett slutförvar där säkerheten huvudsakligen vilar på den geologiska barriären.

I regeringens beslut om det underlag som SKB skulle redovisa innan platsundersökningar för ett KBS-3-slutförvar inleddes ingick ett program för den forskning, utveckling och demonstration som skulle krävas för att föra fram djupa borrhål till samma kunskaps- och teknikutvecklingsnivå som KBS-3. I den utredning som följde redovisades innehåll och omfattning av det Fud-program som krävs. Kostnaden beräknades till drygt 4 miljarder kronor och tiden till cirka 30 år /SKB 2000a/.

I den här rapporten görs en genomgång av konceptet djupa borrhål som omfattar tänkbar utformning, förutsättningarna för bygge och drift samt en modellstudie av grundvattenförhållandena på stora djup. Baserat på detta genomförs en diskussion om konceptets förutsättningar för att uppfylla SKB:s grundläggande krav på ett slutförvarssystem med avseende på långsiktig säkerhet, driftsäkerhet, byggbarhet samt kvalitetssäkring av förvarsdelarnas egenskaper och funktion.

1.2 Tidigare arbeten

Förvarskonceptet djupa borrhål har utretts i ett antal studier från slutet av 80-talet och framåt:

- En förstudie avseende deponering i djupa borrhål /Juhlin och Sandstedt 1989/.
- En jämförelse av olika alternativa system och tekniska lösningar för djupförvaring av använt bränsle genomfördes i Projektet Alternativ Studier för Slutförvar – Pass /SKB 1992/.
- Förvarsalternativet djupa borrhål. Innehåll och omfattning av Fud-program som krävs för jämförelse med KBS-3-metoden /SKB 2000a/.
- Fud-K – Samlad redovisning av metod, platsval och program inför platsundersökningsskedet /SKB 2000b/.
- Systemanalys – Val av strategi och metod för omhändertagande av använt kärnbränsle /SKB 2000c/.
- En granskning av utvecklingen av djupa borrhåls koncepter från 1970 och framåt har genomförts av Nirex inom CoRWM programmet /Nirex 2004/. I denna konstateras att mycket av det arbete som gjorts i USA i själva verket baseras på det som gjorts av SKB redan inom Pass-studien.

Förhållande på stora djup har sammanställts i:

- Sammanställning av geovetenskapliga förhållanden på stora djup (1 000–5 000 meter) i kristallin berggrund /Juhlin et al. 1998/.
- Uppdatering med ny geovetenskaplig information som kommit fram i den öppna litteraturen efter 1998 /Smellie 2004/.

1.3 Säkerhetsfilosofi

Baserat på internationella avtal Sverige förbundit sig att följa och gällande lagstiftning har SKB formulerat krav och principer som ska ligga till grund för utformningen av slutförvar för använt kärnbränsle. I arbetet med att utforma KBS-3-slutförvaret bryts de övergripande kraven successivt ned till utformningskrav som tillsammans med naturliga och tekniska förutsättningar utgör konstruktionsförutsättningar för slutförvaret /SKB 2002/. Målsättningar och metodik har i denna rapport så långt möjligt tillämpats för ett slutförvar i djupa borrhål.

Följande mål och principer gäller:

Kärntekniklagens lagrum:

Använt kärnbränsle ska slutförvaras

Använt kärnbränsle och kärnämne, som inte ska användas på nytt, ska slutförvaras.

Flerbarriärprincipen

Slutförvarets säkerhet efter förslutning ska baseras på flera barriärfunktioner upprätthållna genom ett system av passiva barriärer.

Ej belasta kommande generationer

Slutförvarets säkerhet efter förslutning får inte vara beroende av aktiva insatser från kommande generationer.

Djupförsvaret

Radiologiska olyckor ska förebyggas genom en för varje anläggning anpassad grundkonstruktion i vilken ska ingå flera barriärer, och ett för varje anläggning anpassat djupförsvaret.

Icke spridning av kärnämne

Använt kärnbränsle ska omhändertas så att obehörig befattning med kärnämne förhindras.

Förhindra sabotage

Terroristhandlingar, sabotage eller obehörigt intrång som kan leda till radiologisk olycka ska förhindras.

Bästa möjliga kärnsäkerhetsteknik

SKB ska i sin verksamhet och sina anläggningar så långt det är rimligt med beaktande av bästa möjliga teknik – det vill säga ekonomiskt och industriellt möjlig och tillgänglig teknik – förebygga radiologiska olyckor och förhindra olovlig befattning med kärnämne.

Strålskyddslagens lagrum:

Människa och miljö ska skyddas

Människors hälsa, miljön, biologisk mångfald och hållbart utnyttjande av biologiska resurser ska skyddas från skadlig verkan av joniserande strålning.

Nuvarande och kommande generationer ska skyddas

Ett gott strålskydd ska upprätthållas under hela hanteringen och genomförandet av de olika stegen i omhändertagandet av använt kärnbränsle och i framtiden efter förslutning.

Bästa möjliga strålskyddsteknik

SKB ska i sin verksamhet och sina anläggningar tillämpa bästa möjliga strålskyddsteknik, det vill säga den effektivaste åtgärden för att begränsa utsläpp av radioaktiva ämnen och utsläppens skadliga effekter på människors hälsa och miljön som inte medför orimliga kostnader.

Miljöbalkens lagrum:

Hållbar utveckling

SKB ska i sin verksamhet och sina anläggningar främja en hållbar utveckling som innebär att nuvarande och kommande generationer tillförsäkras en hälsosam och god miljö.

Försiktighetsprincipen

SKB ska i sin verksamhet och sina anläggningar införskaffa den kunskap och utföra de skyddsåtgärder, iaktta de begränsningar och vidta de försiktighetsmått i övrigt som behövs för att förebygga, hindra eller motverka skada eller olägenhet för människors hälsa eller miljön.

Bästa möjliga teknik

SKB ska i sin verksamhet och sina anläggningar använda bästa möjliga teknik – det vill säga den mest effektiva, tekniskt och ekonomiskt möjliga teknik – för att förebygga, hindra eller motverka skada eller olägenhet för människors hälsa eller miljön.

Lokaliseringsregeln

SKB ska för sin verksamhet och sina anläggningar välja plats så att ändamålet kan uppnås med minsta intrång och olägenhet för människors hälsa och miljön.

Hushållnings- och kretsloppsprincipen

SKB ska i sin verksamhet och sina anläggningar hushålla med råvaror och energi samt utnyttja möjligheterna till återanvändning och återvinning.

Produktvalsprincipen

SKB ska i sin verksamhet och sina anläggningar undvika att använda sådana kemiska produkter eller biotekniska organismer som kan befaras medföra risker för människors hälsa eller miljön.

Plan- och bygglagens samt arbetsmiljölagens lagrum:

Säkerhet för brukare

Människor ska kunna arbeta och vistas i och i närheten av slutförvarets anläggningar utan risk för hälsa och säkerhet.

Platsens förutsättningar och kommunens planer

Slutförvaret ska anpassas till platsens förutsättningar och kommunens planer.

Kommuner och övriga intressenter:

Ömsesidighet och frivillighet

SKB:s verksamhet ska bygga på lyhördhet, ömsesidighet, och frivillighet gentemot kommuninvånare, markägare och närboende.

SKB:s ägare:

Kärnkraftprogrammets omfattning och tidsplan

Slutförvaret ska anpassas till det svenska kärnkraftsprogrammet omfattning och tidsplan.

Säkerhet, kvalitet och effektivitet

SKB ska i sin verksamhet och sina anläggningar eftersträva säkerhet, kvalitet och kostnadseffektivitet.

1.4 Syfte och avgränsningar

Syftet med denna rapport är att sammanställa befintlig och ny tillkommen kunskap om konceptet djupa borrhål samt att göra en bedömning av konceptets förutsättningar att uppfylla SKB:s grundläggande krav på ett slutförvars långsiktiga säkerhet, driftsäkerhet, byggbarhet samt kvalitetssäkring av förvarsdelarnas egenskaper och funktion. Det innebär bland annat en genomgång och bedömningar av:

- Teknikutvecklingen avseende anläggande och drift av ett slutförvar enligt konceptet djupa borrhål.
- Faktorer av betydelse för barriärfunktionerna isoleringen och fördröjning av radionuklider samt därmed sammanhängande osäkerhet och möjligheter att minska dessa.
- Möjligheterna att säkerställa att slutförvarets egenskaper överensstämmer med de krav som ställs på de olika förvarsdelarna.

Det bör understrykas att slutförvar i djupa borrhål endast utvecklats och utvärderats som ett koncept, det vill säga baserat på en idé om hur ett sådant slutförvar kan tänkas se ut. Utformningen har inte specificerats och utvecklats till en sådan kunskaps- och teknisk nivå som krävs för att genomföra en säkerhetsanalys enligt rådande praxis och gällande föreskrifter. För att kunna genomföra en säkerhetsanalys jämförbar med dem som görs för ett KBS-3-slutförvar krävs att det forskningsprogram /SKB 2000a/ som beskrivits för djupa borrhål genomförs.

2 Definition och funktion av djupa borrhål

För KBS-3-slutförvar finns en definition och en uppsättning systemkrav som anger hur slutförvaret ska fungera och vilka egenskaper det ska ha för att motsvara de krav och principer som redovisas i avsnittet om Säkerhetsfilosofi (1.3). Nedan anges motsvarande för ett slutförvar i djupa borrhål. Systemkraven är till stor del baserade på tillämpbara föreskrifter, och flera av dem är lika för de båda slutförvarsmetoderna.

Djupa borrhål är ett slutförvar för använt kärnbränsle där:

- Det använda kärnbränslet kapslas in i lastbärande och vattentäta kapslar.
- Kapslarna deponeras i borrhål på 2 000–4 000 meters djup i en salt miljö med försumbar grundvattenomsättning i kristallin berggrund.
- Borrhålet förses med en infodring för att deponering ska kunna genomföras.
- Kapslarna omges av en buffert som håller dem på plats i borrhålet och stabiliserar borrhålets väggar.
- Borrhålet över deponeringsdjup försluts så att dess egenskaper funktionsmässigt liknar det ostörda bergets.

Systemkrav relaterade till kärnsäkerhet och strålskydd som tillämpas för KBS-3 och som också kan ställas på djupa borrhål lyder:

Isolera

Slutförvaret ska isolera det använda kärnbränslet från biosfären.

Fördröja

Om isoleringen bryts ska slutförvaret fördröja radionuklidtransport så att nukliderna då de slutligen når biosfären inte ger upphov till skada.

Upprätthålla flerbarriärprincipen

Slutförvaret ska ha flera barriärer som enskilt och tillsammans ska bidra till och upprätthålla barriärfunktionerna.

Långtidsstabil

Slutförvarets system av barriärer och barriärfunktioner ska erbjuda skydd mot skadlig verkan av strålning så länge som krävs med hänsyn till det använda kärnbränslets radiotoxicitet.

Passivt

Slutförvarets barriärer ska vara passiva.

Möjligt att försluta

Efter genomförd deponering ska slutförvaret vara tekniskt möjligt att försluta.

Robust konstruerat

Slutförvarets barriärsystem och fysiska skydd ska vara tåligt mot felfunktioner och förhållanden, händelser och processer som kan påverka deras funktioner.

Tillförlitligt utfört

Metoder för uppförande, tillverkning, deponering, förslutning och oförstörande provning av slutförvarets barriärsystem ska vara tillförlitliga och driftstabla.

Strålskyddsoptimerat

Bland tekniskt genomförbara alternativa utformningar, tekniker och åtgärder ska de som i ett kort tidsperspektiv bäst begränsar stråldoser till människor och som i ett långt tidsperspektiv bedöms ha den bästa skyddsförmågan väljas.

Skydda personal och besökare från strålning

Stråldoser till personal och andra som vistas i och i närheten av slutförvaret ska begränsas så långt det är rimligen möjligt.

I första hand upprätthålla barriärfunktionerna

Åtgärder som är avsedda att underlätta tillträde, övervakning eller återtagning av deponerat kärnbränsle eller att försvåra intrång får inte försämra slutförvarets barriärfunktioner.

Driftsäkert

Slutförvarets kärntekniska drift ska vara säker.

Väl skyddat och bevakat

Slutförvaret ska vara väl skyddat och bevakat mot intrång och olovlig befattningsmed kärnämne.

För miljöpåverkan har följande systemkrav formulerats för KBS-3 motsvarande krav kan ställas på djupa borrhål:

Ändamålsenligt lokaliserat

I en avvägning mellan långsiktig säkerhet och annan miljöpåverkan ska den plats som genom sin beskaffenhet och sitt läge bedöms mest lämpad för slutförvarets syfte, verksamhet och anläggningar väljas.

Medföra begränsad omgivningspåverkan

Slutförvarets omgivningspåverkan (utsläpp till vatten och luft, buller m m) ska vara så liten som rimligen möjligt.

Resurssnålt

Slutförvaret ska så långt rimligen möjligt vara resurssnålt vad gäller råvaror och energi.

Miljöanpassat i sitt produktval

Produkter med liten inverkan på miljön ska om rimligt väljas och användas vid bygge och drift av slutförvaret.

Krav på flexibilitet och effektivitet gäller även de för båda slutförvarsmetoderna:

Rymma allt kärnbränsle

Slutförvaret ska rymma allt använt kärnbränsle från det nu godkända svenska kärnkraftsprogrammet.

Anpassat till kärnkraftverkens drifttid

Slutförvaret ska byggas och drivas under en begränsad tidsperiod anpassad till kärnkraftverkens drifttid.

Effektivt och kvalitetssäkrat

Slutförvaret ska ha hög kvalitet och vara kostnadseffektivt.

Korrigerbart

Påvisade brister i slutförvarets barriärer eller barriärfunktioner ska kunna korrigeras under bygg- och driftskedet.

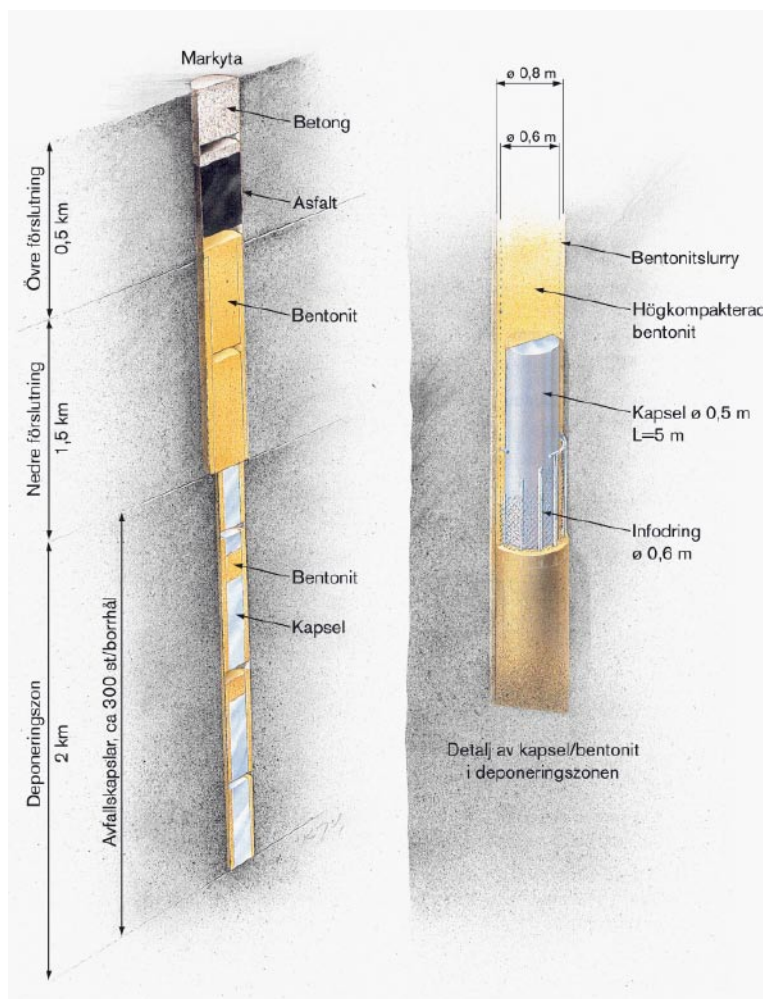
3 Beskrivning av konceptet djupa borrhål

3.1 Inledning

I detta kapitel ges en övergripande beskrivningen av den geologiska barriären samt de alternativa utformningar av förvarskonceptet djupa borrhål som diskuterats och som slutligen ledde fram till det koncept som definierades i Pass-studien /SKB 1992/ och som har legat till grund för denna studie. Det bör påpekas att en del av de koncept och utformningsförslag som förekommit i diskussionerna och som beskrivs nedan av olika skäl inte längre är aktuella.

I förvarskonceptet djupa borrhål är huvudtanken att använt kärnbränsle ska förvaras i borrhål i berggrunden på ett djup mellan 2 000 och 4 000 meter. Konceptet är i princip baserat på samma barriärer som KBS-3-konceptet. Konceptet djupa borrhål bygger emellertid på en säkerhetsstrategi i vilken större vikt läggs på den geologiska barriären i förhållande till ingenjörbarriärerna än i KBS-3-konceptet.

Förvaret kan vertikalt delas in i deponeringsområde och förslutning. Inom deponeringsområdet finns kapsel, buffert, infodring och borrhål/stört berg. Förslutningen sträcker sig från ytan ner till den övre gränsen av deponeringsområdet. Förslutningen delas in i en nedre förslutning av bentonit och en övre förslutning av asfalt och betong. I figur 3-1 är utformningen av ett deponeringshål med deponeringsområde och förslutning illustrerad.



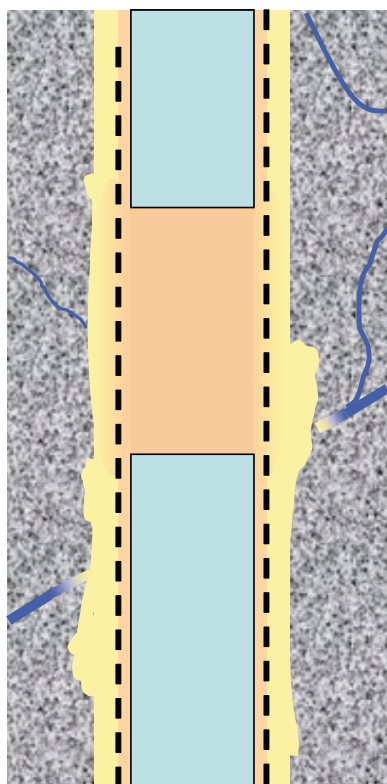
Figur 3-1. Principiell utformning av förvar i djupa borrhål framtagen inom Pass-studien /SKB 1992/. Observera att figuren inte är skalenlig.

I konceptet djupa borrhål innesluts det använda bränslet i kapslar som antas förbli täta cirka 1 000 år. Kapslarna omges av en buffert bestående av en blandning av bentonit och en deponeringslurry. Buffertens funktion är att hålla kapslarna på plats, att motverka advektiv transport i borrhålet samt att ge en retardation av radionuklider som släpps ut från avfallet i kapslar som förlorat sin isolerande funktion. Då kapslarna inte längre är täta utgörs huvudbarriären av den naturliga barriären, det vill säga, det omgivande berget. Detta förutsätter att den naturliga barriären ger ett tillräckligt transportmotstånd för radionuklider vilket i sin tur primärt bygger på att det advektiva flödet på förvarsdjupet 2 000 till 4 000 meter är mycket begränsat. I figur 3-2 visas förenklat de huvudbarriärer som ingår i deponeringsområdet av ett djupt borrhål.

3.2 Geologisk barriär

3.2.1 Den geologiska barriärens funktion

Bergets säkerhetsfunktion i ett förvar i djupa borrhål är huvudsakligen att fördröja radionuklidtransporten till biosfären. Berget på den plats där borrhålet borrar ska kunna upprätthålla denna säkerhetsfunktion. I ett KBS-3-slutförvar har den geologiska barriären funktionen att erbjuda en miljö där ingenjörbarriärernas säkerhetsfunktioner kan upprätthållas och bevaras under lång tid. På de stora djup där ett förvar enligt konceptet djupa borrhål placeras är de termiska, kemiska och mekaniska förhållandena sådana att det för kända ingenjörsmaterial idag saknas den kunskap som krävs för att visa materialens långsiktiga beständighet och barriärfunktion.



Figur 3-2. Schematisk illustration av kapsel, buffert, infodring och omgivande berg i deponeringsområdet

3.2.2 Förhållanden på stora djup

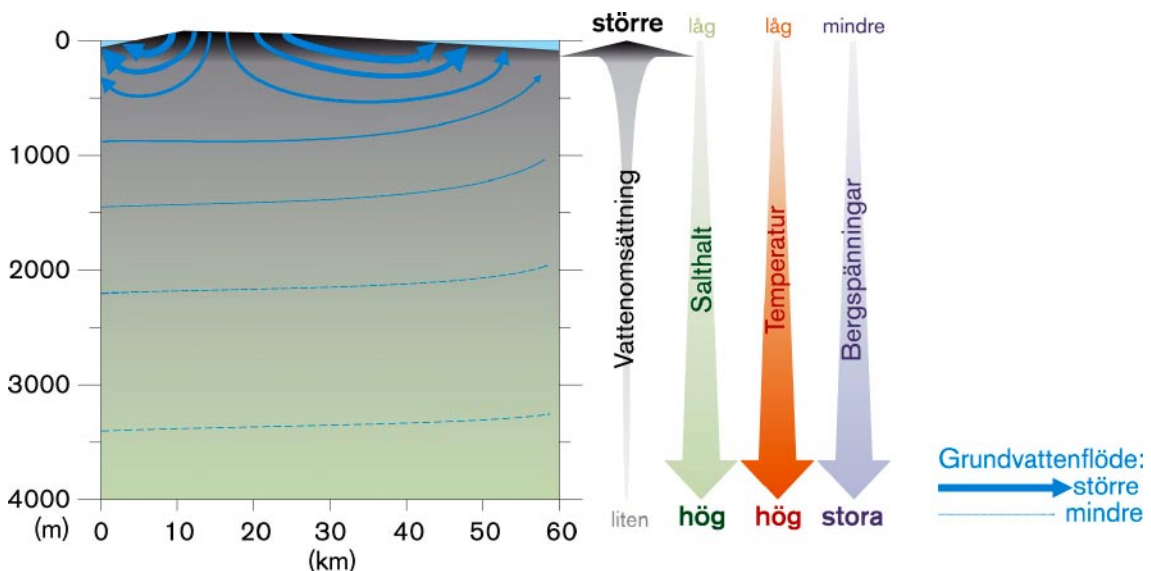
Här ges en översiktlig beskrivning av de förhållanden som kan komma att råda i berggrunden på stora djup. Kunskapen om förhållanden på stora djup baseras på information från ett begränsat antal djupa borrhål. Information som är relevant för kristallint berg och förvarskonceptet djupa borrhål har sammanställts i ett antal studier. Inom förstudien för djupa borrhål gjordes en geovetenskaplig beskrivning av berget och grundvattnet ner till 5 000 meters djup /Juhlin et al. 1998/. En uppdatering med avseende på geovetenskaplig information som blivit tillgänglig efter 1998 har genomförts av /Smellie 2004/. I Nirex granskning av konceptet djupa borrhål görs även en genomgång av hydrogeologiska förhållanden på stora djup /Nirex 2004/. En generell bild av hur olika egenskaper såsom vattenomsättning, salthalt, temperatur och bergspänningar förväntas ändras med djupet ges i figur 3-3.

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

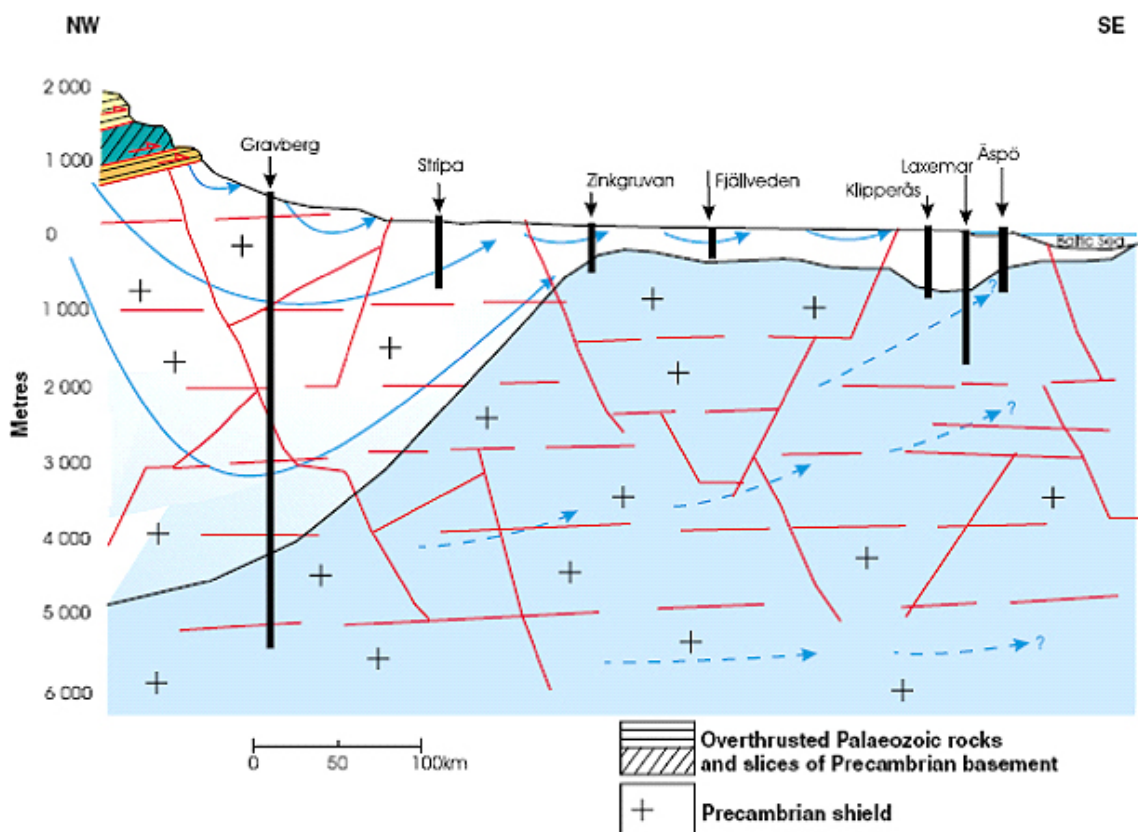
- Kolahalvön – Djupborrhålet SG-3 (12 262 meter).
- Ukraina – Krivoy Rog (5 000 meter).
- Tyskland – Tyska kontinentala djupborrprogrammet KTB (pilothål 4 000 meter och huvudhål 9 101 meter).
- Dalarna – Provboringar för djupgas Gravberg (6 957 meter) och Stenberg (7 000 meter).
- Platsundersökningsprogrammet i Östhammar och Oskarshamn (< 1 700 meter).

3.2.3 Konceptuell geologisk modell

En konceptuell modell av de översta fem kilometrarna av berggrunden i Sverige föreslogs av /Juhlin et al. 1998/, se figur 3-4. I den uppdatering av geologisk information som gjordes av /Smellie 2004/ framkom inget som strider mot denna modell.



Figur 3-3. Översikt av den svenska berggrundens egenskaper och hur de förväntas förändras med djupet /SKB 2002c/.



Figur 3-4. Vattencirkulation och variationer i salthalt längs en profil genom Sverige /Juhlin et al. 1998/.

Termiska förhållanden

Det geotermiska värmeflödet mot markytan bestäms av värmeledningstalet och av den geotermiska gradienten. Värmeflödet kan bestämmas genom mätningar av temperaturen i grunda borrhål. Dessa värden är emellertid ofta för låga, eftersom de har påverkats av klimatet, och måste därför korrigeras för att man ska kunna få fram det verkliga värmeflödet. Genom att anta hur stor bergets värmeproduktion respektive värmekonduktivitet är kan man beräkna temperaturen på djupet. Temperaturen på 5 000 meters djup kan på detta sätt uppskattas till mellan 60 och 105 °C. De mätningar som finns inom den Baltiska skölden visar i regel god överensstämmelse mellan beräknade och uppmätta data. I Gravberg-1 var den geotermiska gradienten nära nog konstant (16 °C/km). I borrhålet SG-3 på Kolahalvön uppvisar däremot gradienten en snabb förändring från 13 °C/km nära ytan till 17 °C/km på 2 800 meters djup.

Hydrogeologiska förhållanden

Den konceptuella modellen bygger på att den övre kilometern av berggrunden innehåller betydligt fler öppna sprickor och är mer permeabel än de djupare delarna. Vattenförande sprickzoner finns dock ner till mycket stora djup. Antagandet om en högre porositet och permeabilitet inom den övre delen är i första hand baserat på geofysiska mätningar men också till viss del på hydrogeologiska observationer. Att bergmassans genomsläpplighet generellt avtar med djupet är en slutsats som även den baserar sig på ett fåtal utförda hydrauliska mätningar på stora djup samt på geofysiska indikationer att bergmassans porositet är betydligt lägre under en till två kilometers djup. Dessutom underbyggs slutsatsen av de hydrokemiska observationerna. Vi vet dock samtidigt att zoner med hög vattenförande förmåga har observerats på stora djup i de flesta djupa borrhål, varför vi inte direkt kan förutsätta att bergmassan på en specifik plats erbjuder en låg permeabilitet på djupet.

Geokemiska förhållanden

När det gäller salt grundvatten vet vi från undersökningar i borrhål att ett relativt sött vatten dominerar åtminstone till cirka 500 meters djup. Salthalten ökar successivt med djupet för att under ett djup av cirka 1 000–1 500 meter i flera fall övergå till värden som motsvarar brine. I områden med förhållandevis flack topografi är aktiv grundvattencirkulation i huvudsak begränsad till den övre kilometern medan vattnet har relativt hög salthalt under denna nivå. Det mycket salta djupa grundvattnet befinner sig i en nära nog stagnant miljö. I områden med större topografiska skillnader kan sötvatten som infiltreras drivas ner till mycket stora djup och gränsen till salt vatten ligger betydligt djupare.

Mekaniska förhållanden

Den storskaliga mekaniska stabiliteten i bergmassan på stora djup är beroende av spänningsfältet, förekomsten av sprickor och sprickzoner och dessa mekaniska egenskaper samt av den seismiska aktiviteten. I den konceptuella modellen ökar spänningsmagnituderna linjärt mot djupet. Sprickor och sprickzoner på stora djup utgör de svagaste och lättast deformerbara delarna av bergmassan. Detta innebär också att de rörelser som sker vid till exempel ett jordskalv i första hand löses ut i dessa diskontinuiteter.

3.3 Borrhål

3.3.1 Definition och funktion

Borrhål är hål för deponering av kapsel och buffert. I delsystemet ingår även det störda berget som omger deponeringshålet. Borrhålet är indelat i en nedre deponeringsdel och en övre förslutningsdel. Borrhål omfattar även metod för borrning och den borrhålsvätska som krävs för att upprätthålla mekanisk stabilitet. Borrhålets nedre del ska medge säker och effektiv deponering av kapslar och buffert, den övre delen ska medge säker förslutning.

3.3.2 Delsystemkrav

För att fylla sin funktion ska borrhålen:

- 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 borras enligt specifikation,
- kunna kontrolleras mot specificerade acceptanskriterier.

Vidare ska borrhålen placeras där de innebär minsta möjliga störning för natur- och kulturmiljö och närboende. Borrningen ska vara så resurssnål som möjligt och förbrukningsmaterial med liten påverkan på miljön väljas. Tillsammans ska borrhålen rymma allt använt kärnbränsle från det svenska kärnkraftsprogrammet och borrhålen ska kunna beredas i en takt anpassad till kärnkraftsprogrammets behov.

Detta innebär att borrhålstekniken ska ge tillräckligt raka och mekanisk stabila borrhål, och att den valda borrhålsvätskan inte signifikant får försämra bergets och barriärernas säkerhetsfunktioner. Borrhålen får inte heller innebära allvarlig påverkan på miljön under bygg- eller driftskedet.

3.3.3 Alternativa utformningar – deponeringsområde

I deponeringsområdet kan ett borrhål med diametern 800 millimeter ses som huvudalternativ /Juhlin och Sandstedt 1989, SKB 1992/. /Harrison 2000/ föreslår av praktiska skäl diametern 838 millimeter. Det finns även föreslaget ett alternativ för kapslar med konsoliderat bränsle där borrhålsdiametern ligger på 700 millimeter och ett alternativ för smala kapslar där borrhålsdiametern är på 400 millimeter /Juhlin och Sandstedt 1989/.

Beroende av borrhållsteknik och djup kan olika borrhållsvätskor till exempel lufttillsatta fluider, grundvatten, bentonit- eller lerslurry, oljebaserade emulsioner, polymertillsatta vätskor och skum användas. För aktuella djup krävs att borrhållningen sker med en borrhållsvätska som kan stabilisera hålet så att borrhålet inte deformeras. Den Na-bentonitslurry som föreslås som borrhållsvätska i /Juhlin och Sandstedt 1989/ har densiteten $1,15 \text{ g/cm}^3$ och i /SKB 2000/ anses det att bentonitslurryn kan ha en densitet upp till $1,5 \text{ g/cm}^3$. Fördelen med att använda en något tätare bentonitslurry är att den kan gå ut i sprickor i den störda zonen runt borrhålet och i viss mån täta berget. I /Harrison 2000/ förordas borrhållning med hammarborrteknik för aktuella djup och denna typ av berg och att ett styvt skum använts som borrhållsvätska.

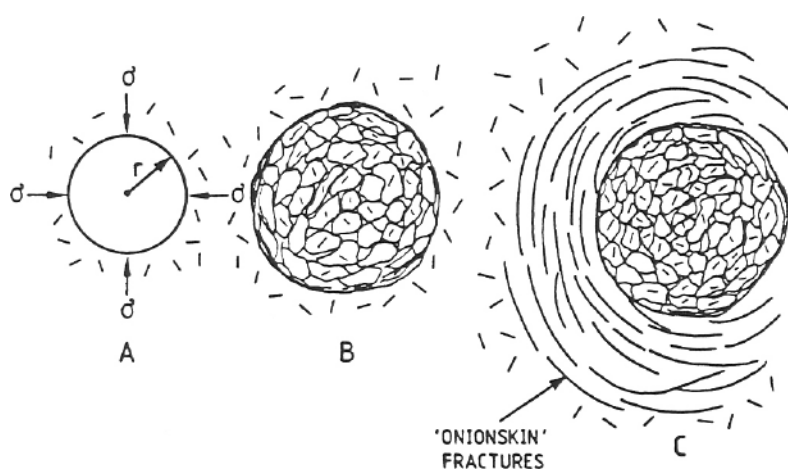
3.3.4 Alternativa utformningar – förslutningsområde

I förslutningsområdet, 0–2 000 meter, föreslås en borrhållsdiameter på 1 675 millimeter i /Juhlin och Sandstedt 1989/. I /Harrison 2000/ föreslås en borrhållsdiameter på 1 168 millimeter ner till 500 meters djup och mellan 500 och 2 000 meter föreslås en diameter på 1 016 millimeter.

3.3.5 Störd zon

Med störd zon avses det uppspruckna berget runt borrhålet. Berget runt borrhålet kommer att vara stört längs hela hålet. Liknande omfördelning av bergspänningar med sprickbildning och bergutfall förväntas i förslutnings- och deponeringsdelarna. Störningarna kan dock förväntas vara mindre närmare ytan vilket till exempel underbyggs av den mindre graden av håld deformation i ytligare delar av borrhålet Gravberg-1, se figur 3-7.

När man borrar ett djupt borrhål bortförs material som tidigare burit upp lokal bergspänning. Därför uppstår ett onaturligt bergspänningsfält runt borrhålet, som i vissa fall kan göra att borrhålet kollapsar. I figur 3-5 visas schematiskt tvärsnittet av ett borrhål som har kollapsat på grund av för hög isotropisk bergspänning. Förutom att berg har rasat in i borrhålet går en störning ut många håldiameter i det omgivande berget. Det skulle vara olämpligt att bygga ett förvar i berg med så hög bergspänning att man riskerar att borrhålen kollapsar.

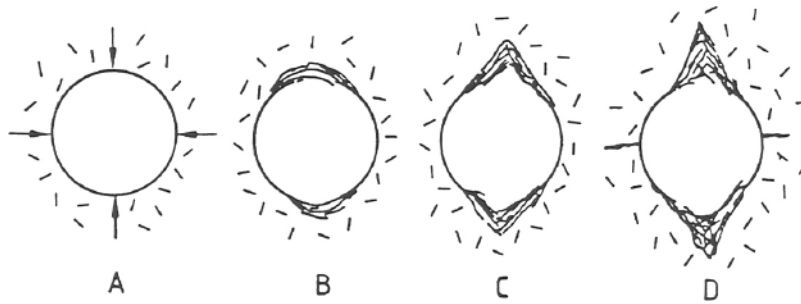


Figur 3-5. Kollapsat borrhål med sprickbildning.

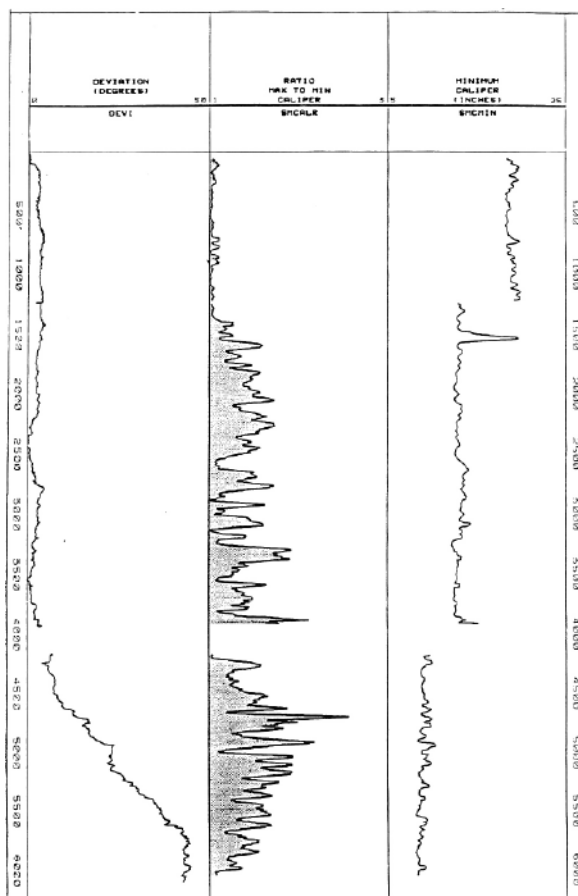
Lägre men ojämnt fördelade bergsspänningar kan dock också påverka berget runt ett borrhål. I figur 3-6 visas borrhål som utsatts för olika stor anisotropisk spänning. En sådan spänning kan leda till ett elliptiskt borrhål där områden med förhöjda spänningar bildas i ellipsens ändrar.

Detta leder till att man lokalt får förhöjda bergsspänningar, vilket i sin tur kan leda till att berget spricker upp. I många fall kan man till och med få bergutfall. I figur 3-7 redovisas en geofysisk logg från det djupa borrhålet Gravberg-1 som visar hur stor deformationen av borrhålet är. Loggen i mitten visar förhållandet mellan max- och min-kalipervärdet (förhållandet mellan den stora och den mindre principaxel) i det elliptiska borrhålet. Som man kan se har bergutfall lett till att den stora principaxeln på förvarsdjup i många fall är dubbla borrhålsdiametern.

Förutom att omfördelning av bergspänning runt borrhålet kan skapa en störd zon, kan en sådan även skapas av den mekaniska påverkan som sker i och med borrningen. Detta kan leda till en förhöjd porositet i den störda zonen /Autio et al. 1999/.



Figur 3-6. Borrhål stört av anisotropisk bergsspänning i olika grad.



Summary of the extent of breakout in Gravberg-1 well

Figur 3-7. Förhållande mellan max/min kaliper, skala 1–3 (mittenloggen).

3.4 Infodring

3.4.1 Definition och funktion

Infodringen är en cylinder av metall som placeras i borrhålet för att medge deponering av kapslar. Delsystem infodring omfattar även inplacering av infodringen i det djupa borrhålet.

3.4.2 Delsystemkrav

För att fylla sin funktion ska infodringen:

- 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.

Det innebär att infodringen ska ha en hållfasthet som motstår påfrestningarna på deponeringsdjup, ha en jämn yta, vara perforerad och tillverkad av ett material som inte påverkar bergets och de övriga barriärernas säkerhetsfunktioner. Vidare ska infodringen kunna installeras på ett säkert sätt i önskad takt.

3.4.3 Alternativa utformningar

För att kunna säkerställa att kapslarna inte fastnar i ojämnheter i borrhålsväggen vid deponering föreslås det i /Juhlin och Sandstedt 1989/ att borrhålet infodras med en permanent infodring. Infodringen föreslås vara gjord av en mässingslegering. Titan föreslås som ett alternativ. I /Harrison 2000/ föreslås en stålinfodring, då nya rön har visat att vätgasproduktionen i samband med korrosion av en sådan infodring är mindre än man ansett tidigare. För att det inte ska uppstå en spalt mellan berg och infodring med lågt transportmotstånd föreslås infodringen vara tillräckligt perforerad för att bufferten ska kunna omsluta den. Ett förslag på en sådan infodring från /Juhlin och Sandstedt 1989/ visas i figur 3-8.

3.5 Buffert

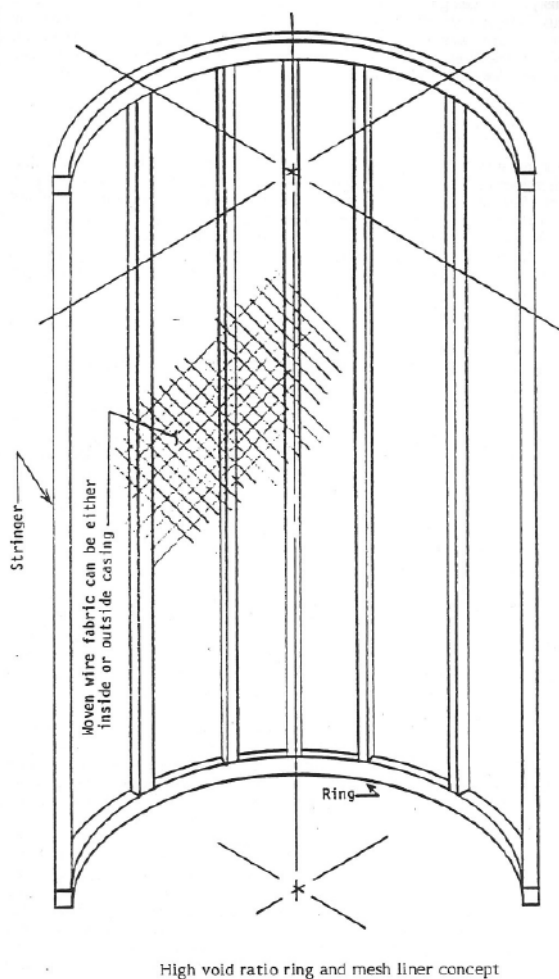
3.5.1 Definition och funktion

På förvarsdjup ska de deponerade kapslarna omges av en buffert. Bufferten består av en slurry och kompakterade block av svällande lera. Buffert omfattar även utbyte av borrhålsvätska mot slurry och deponering av kompakterade block. Bufferten ska hålla kapseln på plats i deponeringshålet och förhindra/begränsa vattenflöde i hålet.

3.5.2 Delsystemkrav

För att fylla sin funktion ska bufferten:

- ha så låg hydraulisk konduktivitet att den advektiva transporten är begränsad,
- 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.



Figur 3-8. Förslag på permeabel infodring.

Det innebär att bufferten ska tillräckligt hög densitet för att begränsa advektion i borrhålet. Bufferten ska utgöras av material som inte påverkar bergets och de övriga barriärernas säkerhetsfunktioner. Vidare ska bufferten kunna installeras på ett säkert sätt i önskad takt.

3.5.3 Alternativa utformningar

Det finns ett samband mellan densiteten hos svällande leror och deras svälltryck och konduktivitet. Bentoniten måste ha en mycket hög densitet för att dess svällningsförmåga inte ska minska påtagligt vid höga salthalter /SKB 2000a/. Användandet av en kompakterad buffert ger dock upphov till problem vid kapseldeponeringen. I motsats till KBS-3-konceptet kan man inte applicera en torr buffert som med tiden mättas upp runt kapslarna, då de djupa borrhålen initialt är fyllda med grundvatten eller annan borrhålsvätska. Huvudförslaget är i stället att fylla den nedre delen av borrhålet med en deponeringsslurry av bentonit och att föra ner högkompakterade bentonitblock mellan paket av kapslar. Vattenhalten i deponeringsslurryn och den högkompakterade bentoniten ska sedan utjämnas (konsolideras) med tiden och en homogent trycksatt bentonitmassa med önskad täthet förväntas uppnås.

I /Juhlin och Sandstedt 1989/ föreslås det att deponeringsslurryn ska bestå av en 30/70 bentonit/kvarts fyllning i 10 % NaCl-lösning. Slurryn, med en densitet av $1,6 \text{ g/cm}^3$, förs först ner till den nedre delen av borrhålet i en behållare. Sedan pressas den ut i de nedre 10 metrarna av borrhålet där den ersätter borrhålsvätskan underifrån. Genom denna slurry trycks ett paket med ett antal kapslar ner.

I /SKB 2000a/ föreslås att en bentonitslurry med densiteten $1,5 \text{ g/cm}^3$ möjligen skulle kunna användas både som deponeringsslurry och borrhållsvätska. Man hänvisar också till nya laboratorieförsök som antyder att densiteten på deponeringsslurryn kan ökas till $1,75 \text{ g/cm}^3$, utan att det blir omöjligt att trycka ner kapslar och bentonitblock. Mellan varje kapsel trycks ett en meter långt cylindriskt block av högkompakterade Na-bentonit ner med en densitet av $2,10 \text{ g/cm}^3$. Efter homogenisering förväntas densitet hos bentonitcylindrarna i kapseländarna vara $1,9 \text{ g/cm}^3$.

Det material som är föreslaget som huvudalternativ för bufferten är bentonit /Juhlin och Sandstedt 1989, SKB 1992/, även om man i /SKB 2000a/ anser att bentonit inte är det självklara valet.

3.6 Kapsel

3.6.1 Definition och funktion

Kapseln är en vattentät och lastbärande metallbehållare i vilken det använda bränslet placeras för deponering. Delsystem kapsel omfattar även produktion, förslutning och oförstörande provning av kapslar. Kapseln ska innesluta det använda kärnbränslet och förhindra spridning av radioaktivitet till omgivningen.

3.6.2 Delsystemkrav

För att fylla sin funktion ska kapseln:

- vara tät vid deponering och helt innesluta det använda kärnbränslet,
- motstå de mekaniska belastningarna vid deponering,
- under minst 1 000 år motstå de påfrestningar som kan förväntas på förvarsdjup,
- ha försumbar inverkan på de övriga barriärernas säkerhetsfunktioner,
- rymma de bränsletyper som ingår i det svenska kärnkraftsprogrammet,
- kunna hanteras och deponeras på ett säkert sätt,
- kunna tillverkas enligt specifikation med hög tillförlitlighet,
- kunna kontrolleras mot specificerade acceptanskriterier.

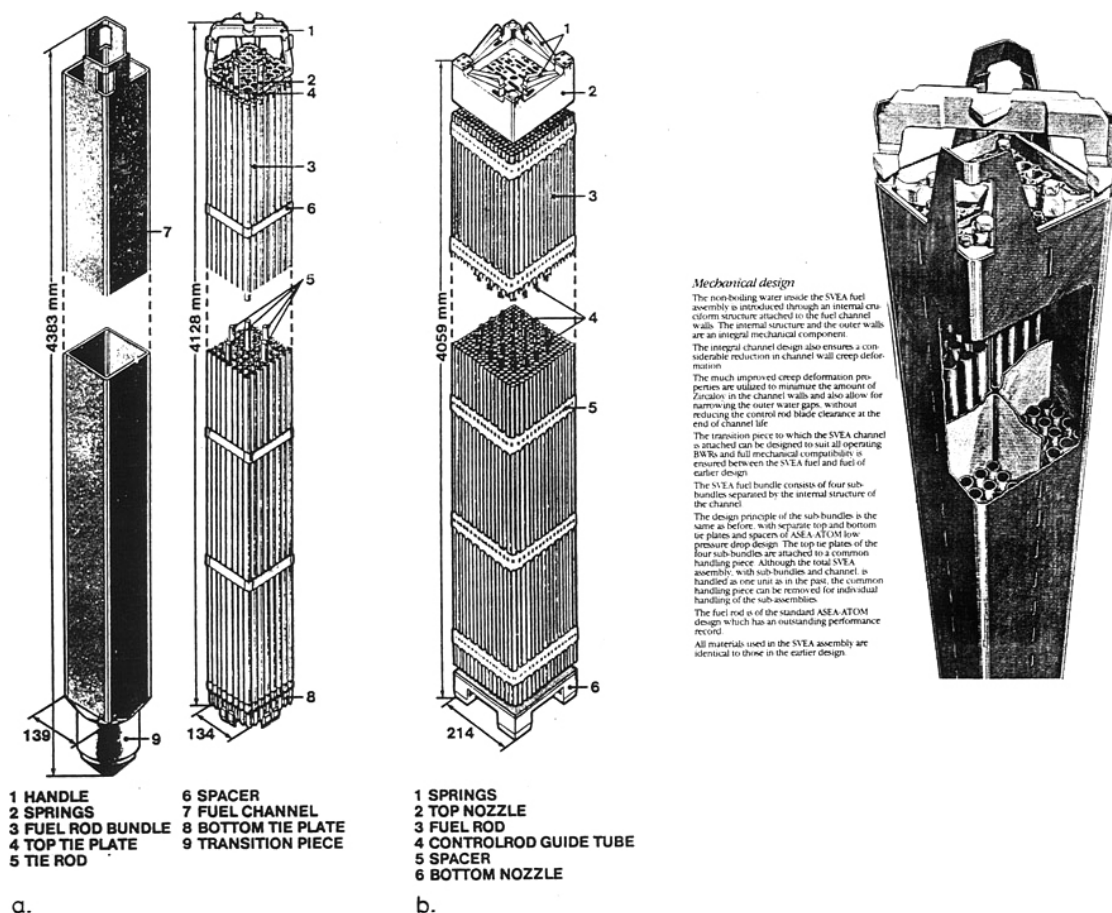
Det innebär att kapseln ska ha en hållfasthet som motstår påfrestningarna vid deponering och på deponeringsdjup, vara tillverkad av ett material som inte påverkar bergets och de övriga barriärernas säkerhetsfunktioner. Vidare ska kapseln kunna installeras på ett säkert sätt i önskad takt.

Bränsleelement

Det finns tre typer av bränsleelement som är aktuella för deponering: BWR, BWR-SVEA och PWR, se figur 3-9.

BWR-elementet innehåller 178 kg uran, består av 63 bränslestavar, har en total längd av 4 383 millimeter och en maximalvidd av 134 millimeter. BWR-SVEA-elementet är en variant av BWR-elementet som i huvudsak skiljer sig genom att bränslestavarna är fördelade på fyra subelement. Dessa subelement kan hanteras separat och har en vidd av 67 millimeter. PWR-elementet innehåller 464 kg uran, består av 264 bränslestavar, har en total längd av 4 059 millimeter och maximalvidd av 214 millimeter /Juhlin och Sandstedt 1989/.

Det använda bränslet kapslas in antingen som hela element eller i konsoliderad form. Med konsoliderad form menas att bränslestavarna plockas ut ur bränsleelementet och placeras tätt tillsammans i kapseln. Fördelen med att konsolidera bränslet är att man kan få in mer bränsle i



Figur 3-9. BWR-, PWR- och BWR-SVEA-element.

en kapsel men det medför samtidigt att värmeutvecklingen från kapseln ökar. Rent utrymmesmässigt kan man få in nästan dubbelt så mycket konsoliderat bränsle i en kapsel /SKB 1992/ i jämförelse med alternativet med hela element. Detta leder i förlängningen till att färre djupa borrhål behövs. Alternativt kan borrhål med en mindre diameter användas. Nackdelarna är att konsolideringsprocessen innebär en komplicerad hantering av högaktivt material samt att bränslelementens metalledlar måste deponeras separat.

3.6.3 Alternativa kapselutformningar

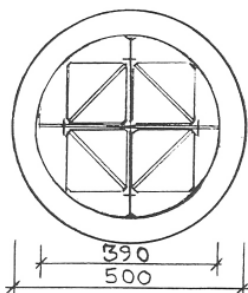
Kapseldimensioner

I figur 3-10 redovisas två föreslagna sätt att placera bränsleelement i kapseln. I alternativ A placeras fyra BWR-element. I alternativ B placeras ett PWR-element och två BWR-SVEA-element fördelade på 8 subelement. Eftersom alla tre typer av bränsleelement ska deponeras är det möjligt att använda båda alternativen i samma hål.

För att kunna placera bränslet enligt föreslaget i figur 3-10 krävs en kapsel med innerdiametern 390 millimeter. En ytterdiameter på 500 millimeter är föreslagen vilket skulle kräva en borrhålsdiameter på 800 millimeter. Detta alternativ är att betrakta som huvudalternativ även om andra alternativ föreslagits. Den föreslagna kapsellängden i /SKB 1992/ är 4 760 millimeter. Om BWR-bränslet lyfts ur bränsleboxarna före inkapsling kan kapslarna göras något kortare vilket troligen medför att borrhålet utnyttjas bättre. Nackdelen är dock att boxarna måste deponeras separat. PWR-bränsle är oboxat /SKB 2000a/. Kapselns längd är inte en lika viktig designparameter för förvaret som kapselns ytterdiameter. Av tillverkningstekniska skäl och hållfasthetsskäl förutsätts kapseln vara utformad som en cylinder med plant lock och plan botten /SKB 2000a/.

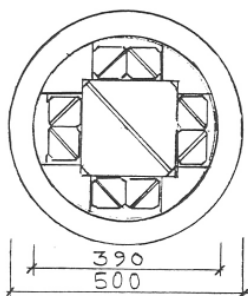
Canister size

Type A, 4 BWR element (maximum width of each element is 134 mm)



Inside diameter	390 mm
Outside diameter	500 mm
Weight uranium	712 kg
Total effect	498 W
Total number of canisters	6488

Type B, 1 PWR element (maximum width 214 mm) and 2 BWR element divided in 8 SVEA subassemblies (maximum width each subassembly 67 mm)



Inside diameter	390 mm
Outside diameter	500 mm
Weight uranium	820 kg
Total effect	620 W
Total number of canisters	3879

Figur 3-10. Placering av bränsleelement i kapsel.

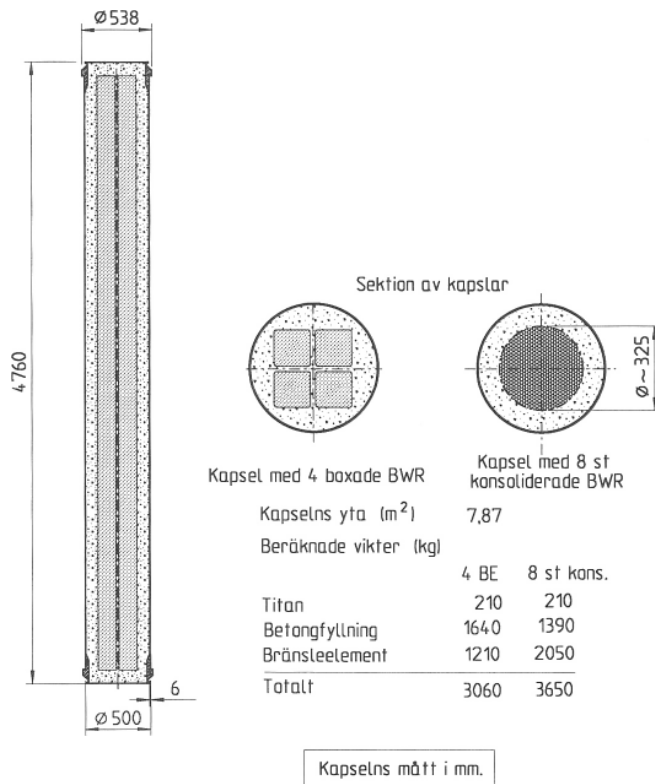
Ett alternativ som föreslagits bygger på den mindre borrhålsdiametern 375 millimeter. Alternativet med en mindre borrhålsdiameter skulle tillåta att kapselns ytterdiameter var cirka 275 millimeter, vilket starkt begränsar mängden använt bränsle som kan deponeras per kapsel. För konsoliderat bränsle har kapselns innerdiameter på 320 millimeter och ytterdiameter på 400 millimeter föreslagits. Detta skulle kräva en borrhålsdiameter på 700 millimeter /Juhlin och Sandstedt 1989/.

Kapsel

Ett antal olika kapselalternativ har presenterats för konceptet djupa borrhål. Kapslarna ska tillverkas, förslutas och kontrolleras med metoder som garanterar att krav på täthet och mekanisk hållfasthet kan uppnås. Vidare ska inga kända korrosionsprocesser kunna leda till att kapselns livslängd blir kortare än 1 000 år i det djupa borrhålet. Kapseln måste även kunna motstå det tryck och de spänningar som existerar på 4 000 meters djup i borrhålet. För den mekaniska hållfastheten har en säkerhetsfaktor satts till minst 2,5 /SKB 2000a/. Ett ytterligare konstruktionskrav är att utformningen måste vara sådan att det använda bränslet förblir underkritiskt även om vatten skulle tränga in i kapseln.

I /SKB 1992/ rekommenderas en titankapsel med betongfyllning utöver andra föreslagna alternativ. Denna kapsel kan användas för både konsoliderat bränsle och hela bränsleelement. Huvuddelen av kapseln består av en 55 millimeter tjockt titancyliner. Lock och bottenplatta föreslås bestå av 100 millimeter tjocka titanplattor. Efter det att bränslet placerats i kapseln fylls utrymmet mellan bränsle och kapsel ut med betong, vars huvuduppgift är att ge mekaniskt stöd åt kapselväggarna, se figur 3-11. Det anses vara det tekniskt enklaste alternativet att deponera hela bränsleelement, då konsolidering innebär ett ytterligare processteg vid inkapslingen.

En rad andra kapselalternativ har diskuterats men har ansetts vara mindre fördelaktiga eller osäkra med då rådande teknik och kunskapsläge. Eftersom en kunskaps- och teknikutveckling har skett, och kan komma att ske, tas även dessa kapselförslag upp kort i denna rapport.



Figur 3-11. Titankapsel med betongfyllning.

Det kapselalternativ som rekommenderas i /Juhlin och Sandstedt 1989/ är en solid kopparkapsel framställd med het isostatisk pressning (HIP) av kopparpulver. I /SKB 1992/ framförs dock att HIP-processen är komplicerad då höga temperaturer och tryck krävs vid inkapsling. Vidare blir det svårt, om ens möjligt, att återta bränslet ur kapseln.

I /Juhlin och Sandstedt 1989/ diskuteras en självbärande titankapsel utan fyllning eller inre stöd. I /SKB 1992/ menade man dock att en titankapsel utan inre stöd måste göras av så tjockt gods att kapselalternativet blir ekonomiskt ointressant.

I /SKB 1992/ diskuteras en stålkapsel. Eftersom stål inte är termodynamiskt stabilt i vatten har denna kapsel en betydligt kortare livslängd än en kopparkapsel. Detta betyder inte med nödvändighet att en stålkapsel skulle vara säkerhetsmässigt oacceptabelt, eftersom förvarskonceptets primära funktion inte ligger i isolering av bränslet utan i fördröjning i geosfären. I /SKB 1992/ diskuteras man även en tunnare men blyfylld stålkapsel, vilken anses kunna isolera bränslet längre än en ren stålkapsel.

I /Juhlin och Sandstedt 1989/ diskuteras en titankapsel, liknande den betongfyllda kapseln, men med en fyllnad av bly. I /SKB 1992/ anser man dock att en sådan blyfylld kapsel varken ger tekniska, säkerhetsmässiga eller ekonomiska fördelar jämfört med en betongfylld kapsel.

I /Juhlin och Sandstedt 1989/ diskuteras en tunnare kopparkapsel med en inre cylinder av stål, liknande KBS-3-kapseln. De mindre diametern, i jämförelse med KBS-3-kapseln, ger dock upphov till hållfasthetsmässiga problem.

I /Juhlin och Sandstedt 1989/ nämns de alternativa fyllningarna glaskulor, blykulor och torrt cementpulver.

I /SKB, 2000a/ anser man att underlaget i tidigare rapporter är otillräckligt för att kunna rangordna tänkbara kapselmaterial.

3.7 Förslutning

3.7.1 Definition och funktion

Förslutning avser material och metod som används för att fylla igen borrhålet i förslutningsområdet över deponeringsområdet. Förslutningen ska begränsa advektiv transport längs borrhålet och bidra till att återställa förvarsplatsen så att den kan användas fritt av kommande generationer.

3.7.2 Delsystemkrav

För att fylla sin funktion ska förslutningen:

- förhindra intrång,
- begränsa advektiv transport i borrhålet,
- vara långsiktigt beständig,
- inte signifikant påverka barriärernas säkerhetsfunktioner,
- kunna installeras enligt specifikation med hög tillförlitlighet,
- kunna kontrolleras mot specificerade acceptanskriterier.

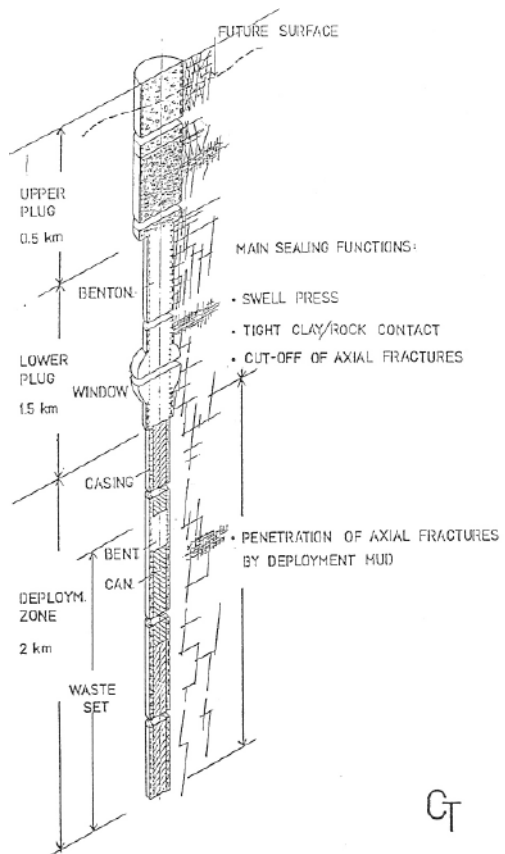
Det innebär att förslutningen ska ha en hållfasthet som motstår yttre påverkan, vara tillverkad av material som inte påverkar bergets och de övriga barriärernas säkerhetsfunktioner. Vidare ska förslutningen kunna genomföras på ett säkert sätt i önskad takt.

3.7.3 Alternativa utformningar

I /Juhlin och Sandstedt 1989/ föreslås det att dela in förslutningen i två delar, den centrala zonen och den övre zonen. I den centrala zonen, 500–2 000 meter, föreslås det att man använder högkompakterad bentonit i förslutningen. I den nedre halvan av den övre zonen, 500–250 meter, föreslås det att man pluggar med asfalt och för den övre halvan av den övre zonen, 250–0 meter, föreslås pluggning med betong, se figur 3-12. I /SKB 2000a/ föreslås att asfaltspluggen och betongpluggen har en tjocklek på åtminstone 50 meter vardera.

Ifall borrhålet i den centrala zonen har en permanent infodring, eller är cementerat, föreslås det i /Juhlin och Sandstedt 1989/ att delar av denna infodring fräses ned för att säkerställa kontakt mellan berg och buffert alternativt att en permanent infodring i den centrala zonen undviks. I /SKB 1992/ föreslås det att man kan fräsa bort delar av det störda berget för att bryta av möjliga hydrauliska ledare (se ”window” i figur 3-12). I /Harrison 2000/ förordas en infodring. Dock bör en permeabel infodring användas i den centrala zonen för att säkerställa kontakt mellan bentonitplugg och berg.

I den centrala zonen, som är pluggad med högkompakterad bentonit, förväntas den hydrauliska konduktiviteten minska med närheten till ytan, på grund av grundvattnets salinitetsutveckling. I den övre delen av den centrala zonen förväntas bentonitens hydrauliska konduktivitet vara lägre än 10–11 meter per sekund. På detta djup är erfarenheter från KBS-3-konceptet direkt överförbara. Förslaget att använda asfalt som förseglingsmedium är baserat på att asfalt behåller sin viskositet över en lång tidsperiod. Betongen i den övre delen av pluggen består med fördel av lågpermeabel betong. Det går dock inte att säkerställa kontakt mellan berget och pluggen i den övre zonen, varför ett relativt lågt transportmotstånd är att vänta här.



Figur 3-12. Borrhål med urfräsning (window) i infodring och stört berg.

4 Förutsättningar för byggnation och drift

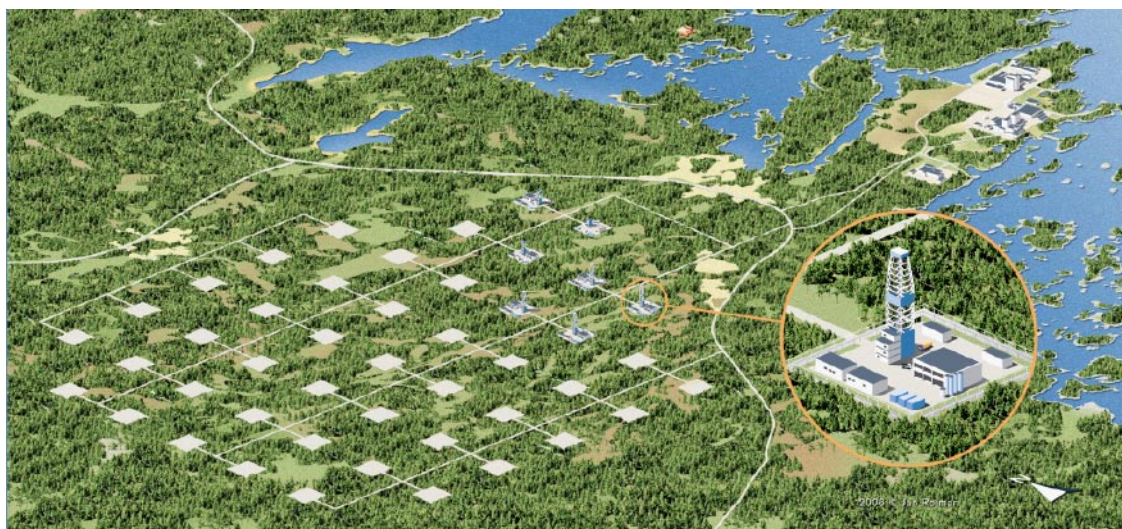
För det svenska kärnavfallsprogrammet (drifttid 40 år) krävs ett slutförvar med ungefär 45 djupa borrhål om varje hål rymmer cirka 300 kapslar. Den totala ytan som tas i anspråk för ett sådant slutförvar blir ungefär 10 km² om avståndet mellan hålen är cirka 500 meter. Hur en förvarsplats med djupa hål skulle kunna se ut visas i figur 4-1.

I en utredning av möjlig borrhästeknik /Harrison 2000/ slås fast att deponeringshål av den antagna typen i granit måste borraras med hammarborrteknik. Detta ställer i sin tur krav på vilken borrhätska som kan användas. I dag finns ingen teknik utvecklad för hammarborrning av stora hål med bentonitbaserad mud (borrhätska). I utredningen föreslås därför att ett styvt skum används. Detta skulle i så fall innebära att man för ner såväl organiska ämnen (skumbildare) som luft i hålet. Inverkan på långsiktig säkerhet och miljö vid användning av denna teknik är inte möjligt att utreda baserat på dagens kunskap.

För att genomföra en borring av den aktuella typen krävs en borrhög som modifierats för att klara hanteringen av infodringen. Maskiner av detta slag är utrymmeskrävande. I figur 4-2 visas en borrhög som användes för att borra ett 9 km djupt hål i Tyskland. Riggens höjd är 63 meter. Noteras kan att detta hål var endast 44,5 cm i diameter ner till cirka 3 km och ännu smalare längre ner. Bilden ger en anvisning om hur en borrhög vid en deponi skulle kunna komma att se ut.

Tiden för att borra och infodra ett 4 km långt deponeringshål med diametern 80 cm i de undre två kilometrarna anges i utredningen till 137 dagar med den föreslagna tekniken. Till denna tid kommer tid för anläggning av borrhög, borring och loggning av pilothål, med mera. Det förefaller därför rimligt att anta att det krävs åtminstone ett år för att anlägga ett borrhål från start till deponering av första kapseln.

I utredningen redovisas ett förslag till deponeringsteknik som går ut på att ett gripverktyg appliceras på samma borrhög som använts för borringen av deponeringshålet. Man anger att en kapsel på detta sätt bör kunna anbringas med 10 cm precision i djupled på djupet 4 km. För att förbereda för återtagbarhet bör kapselns passtycke fettas in innan man drar upp deponeringsverktyget. På detta sätt undviker man utfällningar av till exempel barit. Vidare bör kapselns mantelytor förses med distansorgan för att centrera kapseln i hålet, som lämplig utformning av



Figur 4-1. Exempel på utformning av förvarsplats i konceptet djupa hål.



Figur 4-2. Borrigg – UTB-1 GH 300 EG - använd i det kontinentala djupborrningsprogrammet i Tyskland. /Harrison 2000/.

dessa anges långsgående fenor av till exempel kevlar eller HDPE. Metallfenor rekommenderas inte eftersom de om de deformeras är så pass starka att de skulle kunna sätta fast kapseln och omöjliggöra fortsatt deponering i hålet.

Eftersom borriggen används för hantering av använt kärnbränsle under deponeringsfasen blir varje borrhålsplats en kärnteknisk anläggning med vad det innebär av krav på fysiskt skydd och kontroll av klyvbara ämnen. Hur många sådana borrhålsplatser som behöver vara i drift samtidigt beror på tidsåtgången för anläggning av deponeringshål (cirka 1 år enligt ovan), deponering av 300 kapslar och förslutning.

Den erforderliga tiden för deponering av kapslar i hålet anges inte i utredningen. Tider för detta har publicerats på annat håll. Man finner dock att dessa bygger på en bakåträkning av vad som skulle krävas om man skulle hålla samma deponeringstakt som i KBS-3 snarare än på en realistisk tidsuppskattning. Den för KBS-3 planerade deponeringstakten är en kapsel per arbetsdag eller cirka 200 kapslar per år. Eftersom kapslarna i konceptet djupa borrhål rymmer färre bränsleelement skulle det krävas deponering av 600 kapslar per år för att hålla samma takt. Under antagandet att kapslarna förs ned i paket om två kapslar i taget skulle man således behöva deponera 300 paket om året.

Deponering av ett kapselpaket omfattar följande operationer:

- Förträngning av borrhålsvätska med deponeringsslurry i den del av hålet som kapslarna ska ligga.
- Iordningställande av deponeringspaket med två kapslar och mellanliggande bentonitkuddar.
- Nedförning av kapselpaket.
- Uppdragning av deponeringsverktyg.

Åtminstone steg 2 måste ske strålskärmad. Sannolikt kan stegen 1 och 2 ske parallellt medan övriga steg måste ske i sekvens. Om en sekvens kan genomföras på två dagar krävs det att deponering genomförs samtidigt i två hål för att den ovan angivna takten ska kunna upprätthållas. Detta kräver i sin tur att nettohastigheten för kapselpaketet ner genom hålet inklusive tid för skarvning av borrhålssträng etcetera måste vara 5–10 cm per sekund på om arbetet bedrivs på tvåskift. Det saknas idag underlag för att bedöma realismen i ett sådant antagande.

För att deponering kontinuerligt ska kunna pågå i två hål samtidigt måste anläggning av två nya hål pågå parallellt. Detta innebär att det krävs sammanlagt fyra riggar i drift samtidigt om den ovan angivna deponeringstakten är realistisk. Om det tar dubbelt så lång tid att deponera blir antalet borrhigar i drift åtta, etc.

Behovet av mark för en borrhplats inklusive utrustning för mottagning av kapslar, fysiskt skydd, etc uppskattas uppgå till cirka 1 hektar. Det totala markbehovet för 45 borrhplatser och tillfartsvägar kan uppskattas till cirka 1 km² inom ett område av på knappt 10 km².

5 Förutsättningar för bedömning av långsiktig säkerhet

I Pass-studien /SKB 1992/ genomfördes en utvärdering av ett flertal slutförvaringskoncept vad avser konceptens tekniska genomförbarhet, kostnader samt konceptens långsiktiga funktion och säkerhet. I den del som avsåg långsiktig säkerhet /Birgersson et al. 1992/ konstateras att säkerheten för konceptet djupa borrhål i princip vilar helt på den omgivande berggrunden. Nedan görs en förnyad genomgång av förutsättningarna för en säkerhetsbedömning av detta koncept.

5.1 Den geologiska barriärens isolerande och fördröjande förmåga

Som beskrivits i avsnitt 3.2 antas normalt att grundvattnet i flacka områden i södra Sverige är salt under cirka 1 kilometers 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 under i flacka landskap har varit stagnant under mycket långa tider. Ett sådant system kan också förväntas förbli stabilt under lång tid om situationen förblir ostörd.

När ett slutförvar enligt konceptet djupa borrhål byggs i en sådan formation introduceras potentiella flödesvägar längs borrhålet i form av en störd zon med ökad sprickighet och ett borrhål med en återfyllnad av ett buffertmaterial bestående av en blandning av svällande lera och vatten. Vidare medför såväl anläggandet av deponeringshålen som deponeringen av använt bränsle risker för en påverkad gradientbild genom introduktion av sötvatten och värmegenerering.

/Claesson et al. 1992/ genomförde beräkningar av värmedriven strömning i och omkring ett djupt borrhål i ett berg med salt grundvatten. Resultaten från dessa beräkningar visar att den maximala uppåtriktade förflyttningen av grundvatten orsakad av termiskt inducerat flöde är 60–70 meter. Beräkningarna visar dessutom att denna slutsats gäller oberoende av avståndet mellan borrhålen så länge detta överstiger cirka 200 meter. I avsnitt 5.6 redovisas modellberäkningar för ett slutförvar med 45 deponeringshål som ytterligare belyser förutsättningarna för grundvattensituationens stabilitet.

Det bör i detta sammanhang påpekas att den geologiska modell som beskrivs i avsnitt 3.2 bygger på observationer från ett fåtal djupa borrhål som divits i andra syften än att undersöka lämpligheten av djupt liggande kristallint urberg för deponering av använt kärnbränsle. Dessa hål är dessutom geografiskt spridda och befinner sig i geologier som inte med nödvändighet överensstämmer med dem som skulle bli aktuella för ett slutförvar i Sverige.

5.2 Förslutningen

Förslutningen förväntas inte bidra till slutförvarets isolerande funktion. Förslutningens huvudsakliga funktion är att förhindra ett vertikalt advektivt flöde i borrhålet, att förhindra intrång i förvaret och att förhindra olovlig befattning med kärnämne. Vidare ska förslutningen göra det möjligt att utnyttja förvarsplatsen för andra ändamål.

Eftersom kontakten mellan pluggen och berget i de övre 500 metrarna inte kan säkerställas kan man inte räkna med något större transportmotstånd i denna del. I den centrala zonen med bentonitbuffert (500–2 000 m) förväntas den undre delen ha samma transport och fördröjningsegenskaper som bufferten på förvarsdjup. I den övre delen av den centrala zonen

föväntas dock bentonitpluggningens hydrauliska konduktivitet vara så liten att transporten är diffusionsstyrd (jämför med bufferten i KBS-3-konceptet på samma djup). I den övre delen förväntas även bentonitbuffertens fördröjningsegenskaper, det vill säga sorptionskapacitet och porositet, vara jämförbara med dem framtagna för KBS-3-konceptet.

Det bedöms som icke önskvärt att installera en permanent ickepermeabel infodring i förslutningszonen, eftersom den äventyrar kontakten mellan pluggningsmaterialet och berget. Om en sådan infodring erfordras under borrhning och deponering borde den tas bort helt innan pluggning.

5.3 Buffert

Isolering

På samma sätt som i KBS-3-konceptet skyddar den omgivande bufferten kapseln. Bufferten ger ett transportmotstånd mot ämnen som är korrosiva för kapselmaterialet och skyddar mekaniskt. Härigenom bidrar bufferten till kapselns isolerande funktion.

Fördröjning/transport

Fördröjningsprocesser i bentonitbufferten har studerats ingående för de förvarsförhållanden som gäller i KBS-3-konceptet. Huvudparametrar för fördröjningen är sorptionskoefficienten K_d , den effektiva diffusiviteten D_e och den diffusionstillgängliga porositeten. Fördröjning kan även ske med andra fastläggningsprocesser än sorption, till exempel fällning och medfällning.

Många erfarenheter från studier inom KBS-3-konceptet kan användas när fördröjningen i bufferten ska bedömas i konceptet djupa borrhål. Resultaten är däremot inte direkt överförbara eftersom temperaturen och grundvattenkemin, då främst jonstyrkan, skiljer sig. Den höga jonstyrkan kan minska buffertens sorptionskapacitet när det gäller vissa ämnen. Den påverkar även buffertens svälltryck på ett negativt sätt (svälltrycket är lägre vid högre jonstyrka).

Vidare kan den höga temperaturen leda till att omvandlingsprocesser i bufferten, till exempel montmorillonit/illit, går fortare i jämförelse med i KBS-3-konceptet. Detta gör att buffertens sorptionsegenskaper kan förändras. I många fall kan även jämvikten mellan sorberade och lösta radionuklider förskjutas om temperaturen förändras. För att öka kunskapen om fördröjningen i bufferten under dessa förvarsförhållanden behövs ytterligare forskning.

Fördröjningsparametrarna beror inte bara av grundvattenkemin och temperaturen, utan även av buffertens sammansättning och densitet. Den kapselomgivande buffertens densitet är beroende av mängdförhållandet mellan deponeringsslurry och de hårdkompakterade bentonitblocken samt av graden av homogenisering. Tidigare studier av djupa borrhål har visat att man kan få kraftiga bergutfall på djupet. Detta skulle kunna leda till att förhållandet mellan deponeringsslurryn och bentonitblocken förskjuts så att en lägre totaldensitet fås. Detta har inte bara konsekvenser för fördröjningsparametrarna utan även för buffertens hydrauliska egenskaper. I /SKB 2000a/ pekar man på att de detaljerade processerna vid homogenisering av block och deponeringsslurry måste analyseras noggrant, för att lämplig slutdensitet och sammansättnings ska uppnås på den kapselomgivande bufferten.

5.4 Infodring

Infodringens huvudfunktion är att säkerställa att kapslarna kan föras ner i deponeringshålet utan att detta blockeras av bergutfall. Infodringen förväntas inte ha någon barriärfunktion. Infodringen bryts med tiden ner av korrosionsprocesser. Om, som antagits i denna studie, infodringen är gjord av stål kan korrosionen leda till gasutveckling som kan bidra till att skapa vertikal strömning i och omkring deponeringshålet. Den allmänna uppfattningen förefaller dock vara att gasbildningen skulle bli för långsam för att menligt påverka spridningsförloppet för radionuklider.

5.5 Kapsel

Isolering

Kapslarna i förvarskonceptet djupa borrhål kan inte förväntas förbli täta under mycket lång tid. I Pass-studien bedömdes ett krav på att kapslarna ska förbli täta i 1 000 år som rimligt. Detta krav är baserat på att bränslets radiotoxicitet, på grund av avklingning, har reducerats med cirka en faktor 10 på 1 000 år. En ytterligare tiofaldig reduktion erhålls först efter ytterligare 50 000 år /SKB 2000/.

Under kapselns livslängd ska den innesluta det använda bränslet. Det innebär att den inte ska ha några initiala defekter och att inga defekter som leder till att inneslutningen bryts och otätheter uppstår på grund av mekanisk belastning eller korrosionsprocesser.

Beständighet mot korrosion kan uppnås på flera sätt. Ett alternativ är att kapseln är tillverkad av ett material som är korrosionsbeständigt under rådande förutsättningar, till exempel ädelmetaller eller stabila keramer. Den omfattande forskningen på kopparkorrosion som gjorts för KBS-3-konceptet är inte direkt överförbar till konceptet djupa borrhål. Den förhöjda salthalten på förvarsdjupet 2 000–4 000 meter samt den förhöjda temperaturen leder till att korrosionshastigheten sannolikt är högre jämfört med i KBS-3-konceptet.

Ett annat alternativ är att kapselmaterialet skyddas passivt, genom att ett tunt lager av korrosionsprodukter bildas. Till de passiva metallerna hör titan, titanlegeringar, rostfria stål med flera. Korrosionsdata för titan från det kanadensiska kärnavfallsprogrammet är i viss utsträckning tillämpbara för konceptet djupa borrhål, då det kanadensiska förvaret förutsätts ha höga kloridhalter. Baserat på dessa data bedöms en titankapsel ha en livslängd på i storleksordningen 1 000 år.

Ett tredje alternativ är att tillverka kapseln i ett material som korroderar på ett förutsägbart sätt, vilket ger den korrosionsmån som garanterar kapselns livslängd. Ett sådant material är låglegerat kolstål. Detta alternativ har inte diskuterats i någon omfattande utsträckning inom det svenska kärnavfallsprogrammet.

Kravet på att kapseln ska ha en livslängd på minst 1 000 år gör att korrosionshastigheten inte med nödvändighet blir styrande för valet av kapselmateriäl. Det kan visa sig att konstruktionsmålen kan nås med flera alternativa material, där materialets mekaniska egenskaper blir styrande /SKB 2000a/. Den maximala tryckbelastningen på kapseln i förvaret beräknas vara 45 MPa, vilket är summan av det hydrostatiska trycket och svälltrycket från bentoniten /Juhlin och Sandstedt 1989/. En ytterligare belastning på grund av horisontellt tryck kan uppstå om borrhålet deformeras, till exempel vid en jordbävning. Eftersom det bildas ett belastningsfält runt borrhålet kan dess tvärsnittsarea bli elliptiskt, genom omfördelning av bergspänningarna. Detta har observerats i till exempel det djupa borrhålet Gravberg-1, där bergutfall var vanligt förekommande. I dagens läge är kunskapen angående processer som kan leda till deformation av borrhålet och belastning på kapseln på förvarsdjupet 2 000–4 000 meter mindre än på förvarsdjupet i KBS-3-konceptet.

Defekter på kapseln kan även uppstå vid deponeringen. I /SKB 1992/ görs bedömningen att förhållandena vid deponeringen är sådana att man ej kan garantera att kapslarna är intakta efter deponering. Att hitta en deponeringsmetod som säkerställer att kapslarna är intakta efter deponering bör prioriteras. Ny deponeringsteknik diskuteras i bland annat /Harrison 2000/.

Fördröjning/transport

Med fördröjning menas här den fördröjning som sker innan radionuklider kan migrera ut i bufferten från en defekt kapsel. Denna fördröjning kommer att se olika ut beroende på kapseldefekten. Uppstår en större defekt, till exempel om en kapsel skjivas av i ett jordskalv, kommer i huvudsak bränsleupplösning bestämma emissionshastigheten av radionukliderna till bufferten. Uppstår en mindre defekt, till exempel en frätgrop, kommer kapseln fortfarande utgöra ett transportmotstånd vilket tillsammans med bränsleupplösningen bestämmer emissionshastigheten till bufferten.

Bränsleupplösning

En förutsättning för att kunna beskriva kinetiken för upplösning och oxidation av bränslematrisen i djupa borrhål är att man har information om hydrokemin på djupet. Många av de faktorer som används för att beskriva bränslet och bränsleupplösningen är liknande de som används i KBS-3-konceptet. Däribland finns faktorer som strålningsintensitet, radionuklid-innehåll, tryck, vattenflöde med mera. Det som skiljer sig påtagligt mellan koncepten är grundvattnets salinitet och kapselns temperatur. Detta påverkar både bränsleupplösningshastigheten, specieringen och bildandet av sekundära produkter. I /SKB 2000a/ identifieras ett antal områden där omfattande forskningsinsatser behövs innan man kan karakterisera bränsleupplösningen i konceptet djupa borrhål.

Transportmotstånd

Kapselns primära barriärfunktion är dess isolerande förmåga. När en kapsel har förlorat sin täthet genom de mekanismer som beskrivs ovan finns det givetvis ett visst transportmotstånd i såväl kapselfyllningen som i eventuella korrosionsprodukter. Detta kan i dagsläget inte kvantifieras då förloppen är dåligt utredda.

5.6 Modellstudie av den geologiska barriärens isolerande förmåga

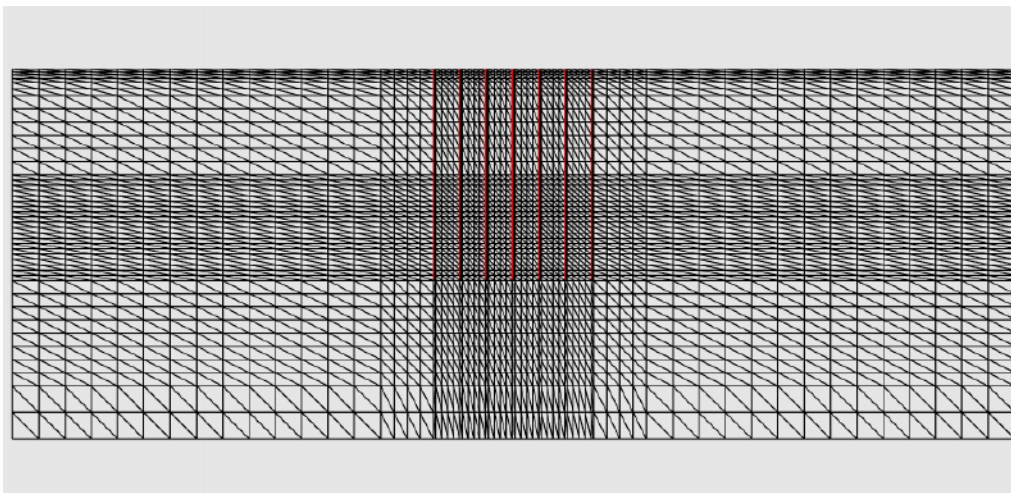
För att undersöka om slutförvaret eller andra faktorer skulle kunna störa de förväntat i princip stagnanta grundvattenförhållandena har en serie modellberäkningar genomförts /Marsic et al. 2006/. Ett slutförvar med 45 hål med 300 kapslar vardera inlagda mellan 2 och 4 kilometers djup beskrevs förenklat i en tredimensionell finit elementmodell. Modellen omfattade en bergvolym $19 \times 19 \times 7$ km. Bergmassans hydrauliska konduktivitet ansattes till 5×10^{-11} m/s under nivån -500 meter, 10^{-9} m/s mellan 100 och 500 meter samt 10^{-7} m/s i de övre 100 metrarna.

För att undersöka om slutförvaret eller andra faktorer skulle kunna störa de förväntat i princip stagnanta grundvattenförhållandena har en serie modellberäkningar genomförts /Marsic et al. 2006/. Ett slutförvar med 45 hål med 300 kapslar vardera inlagda mellan 2 och 4 kilometers djup beskrevs förenklat i en tredimensionell finit elementmodell. Modellen omfattade en bergvolym $19 \times 19 \times 7$ km. Bergmassans hydrauliska konduktivitet ansattes till 5×10^{-11} m/s under nivån -500 meter, 10^{-9} m/s mellan 100 och 500 meter samt 10^{-7} m/s i de övre 100 metrarna.

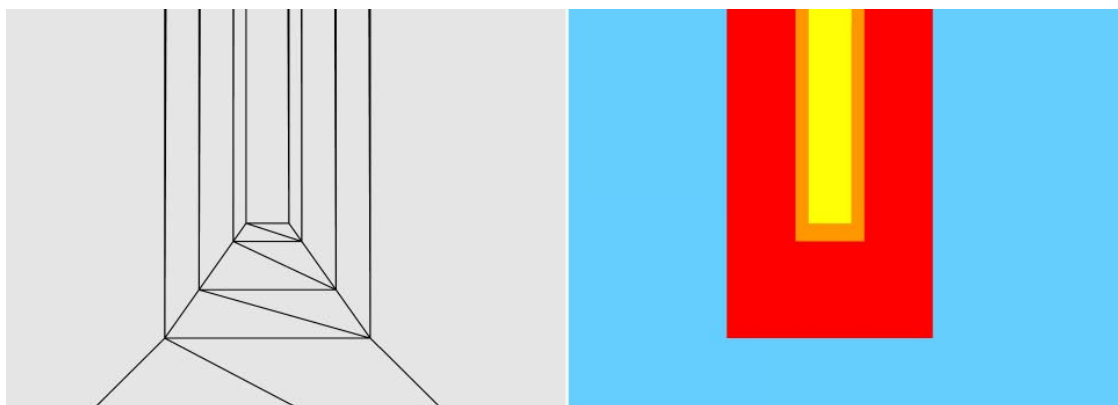
Figur 5-1 visar det finita elementnätet och figur 5-2 visar hur ett borrhål representeras i modellen. Varje borrhåls diameter är 0,8 meter med en hydraulisk konduktivitet på 10^{-9} m/s och omges av en störd zon med tjockleken 0,8 meter och med den hydrauliska konduktiviteten 5×10^{-9} m/s. Hålet ovanför deponeringszonen, det vill säga i de övre 2 kilometrarna ansattes samma hydrauliska egenskaper i borrhålet som för omgivande berg.

Modellen användes för att beräkna kopplad transport av vatten, salt och värme. Initialt ansattes en geotermisk gradient på 16 °C/km med en temperatur på ytan av 6 °C som hölls konstant. I de övre 700 metrarna antogs grundvattnet ha inblandningen 0 % av salt. Mellan 700 och 1 500 meter djup ökades inblandningen av salt linjärt från noll till 10 %. Grundvatten på djup större än 1 500 meter antogs ha en salthalt om 10 % vilket motsvarar en densitet på $1\,100$ kg/m³.

På modellens vertikala yttertytor ansattes nollflödesrandvillkor för såväl grundvatten och salt som för värme. För grundvatten och salt har nollflödesrandvillkor använts även på modellens bottenyta medan randvillkoret för värme här är ett konstant geotermiskt flux på $41,8$ mW/m². På modellens toppyta ansattes ett i tiden konstant atmosfärstryck som i vissa beräkningar hölls konstant över hela ytan och i andra följde en gradient med 1 % lutning med högst tryck i modellens vänsterkant och lägst i högerkanten.



Figur 5-1. *Vy från sidan av det använda finita elementnätet. Finita element av rätblockstyp användes. Trianguleringen i figuren är en artefakt av det använda grafikprogrammet. Borrhålens lägen representeras med rött. Borrhålen ryms inom ett 3×3 km stort område.*

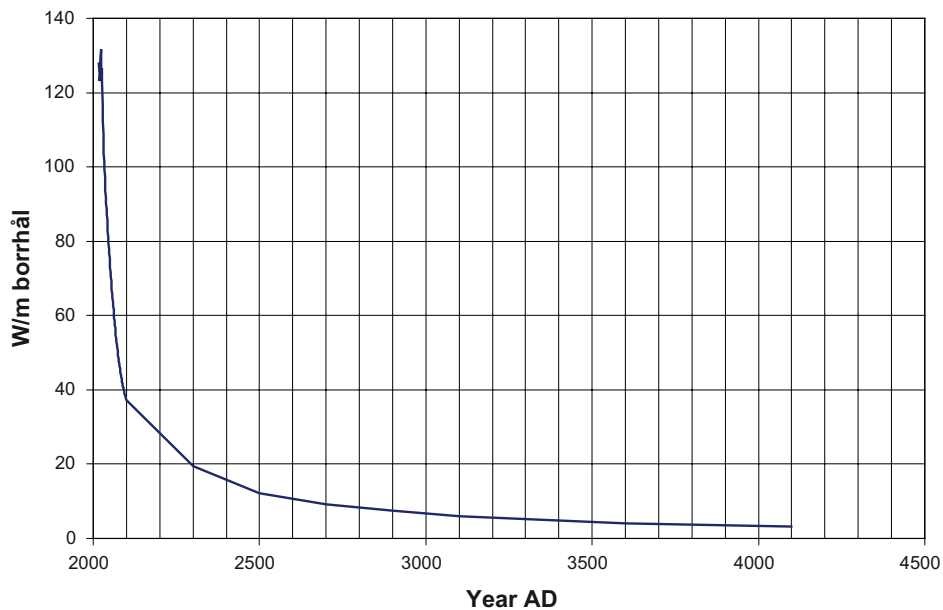


Figur 5-2. *Vy från sidan av diskretiseringen av ett borrhåls nedre del. Det gula fältet representerar kapslarna, det orange bufferten i borrhålet, det röda den störda zonen runt borrhålet och det blåa fältet det omgivande berget.*

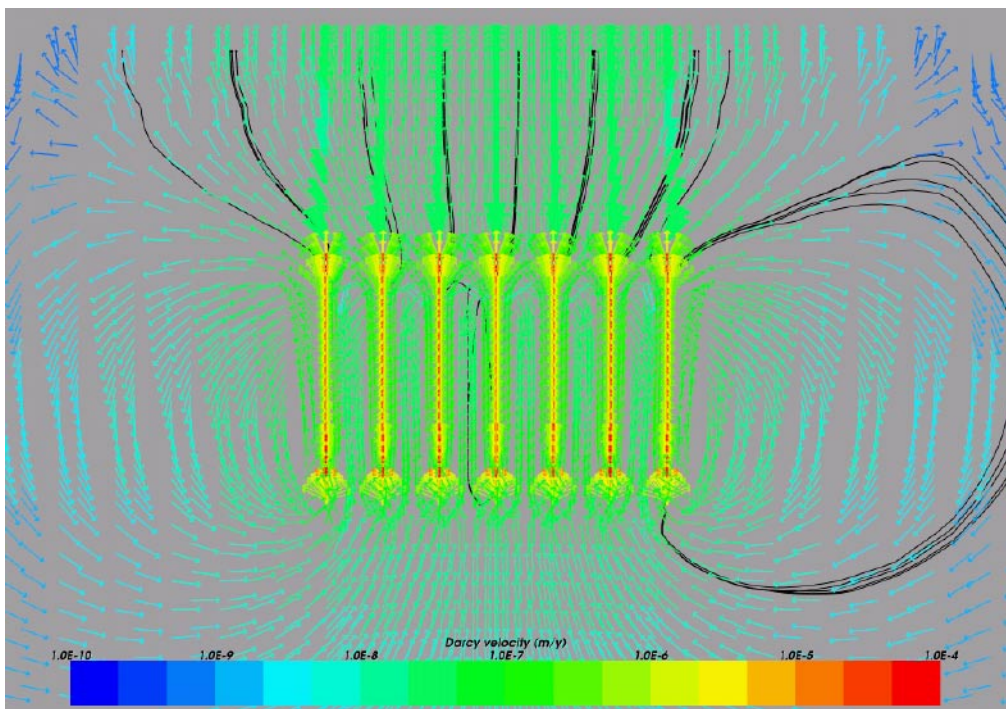
Det använda bränslet i de deponerade kapslarna avger värme på grund av det radioaktiva sönderfallet. Resteffekten i bränslet avtar med tiden på grund av avklingningen av bränslets radioaktivitet. Värmeutvecklingen (den så kallade resteffekten) i det bränsle som fås från driften av de svenska kärnkraftsprogrammet har nyligen beräknats /Agrenius 2006/. I figur 5-3 redovisas den genomsnittliga avgivna värmeeffekten per meter borrhål som funktion av tiden baserat på att bränslet lagras in i titankapslar på det sätt som beskrivs i avsnitt 3.6.

I beräkningarna har deponeringen antagits ske när värmeutvecklingen är som störst, det vill säga cirka år 2020. Det bör påpekas att det tidigare diskuterade behovet av teknikutveckling och forskning innebär att en så tidig deponering inte är realistisk.

I figur 5-4 visas flödespilar och flödeslinjer för ett basfall där trycket är detsamma över hela överytan och bergmassan inte innehåller några sprickzoner. Flödeslinjerna har endast lagts in för att illustrera flödesfältet. De beräknade flödestiderna längs flödeslinjerna är i storleksordningen 10^8 år, det vill säga mycket längre än varaktigheten av värmeavgivningen i kapslarna. Dessa flödestider är således inte realistiska.



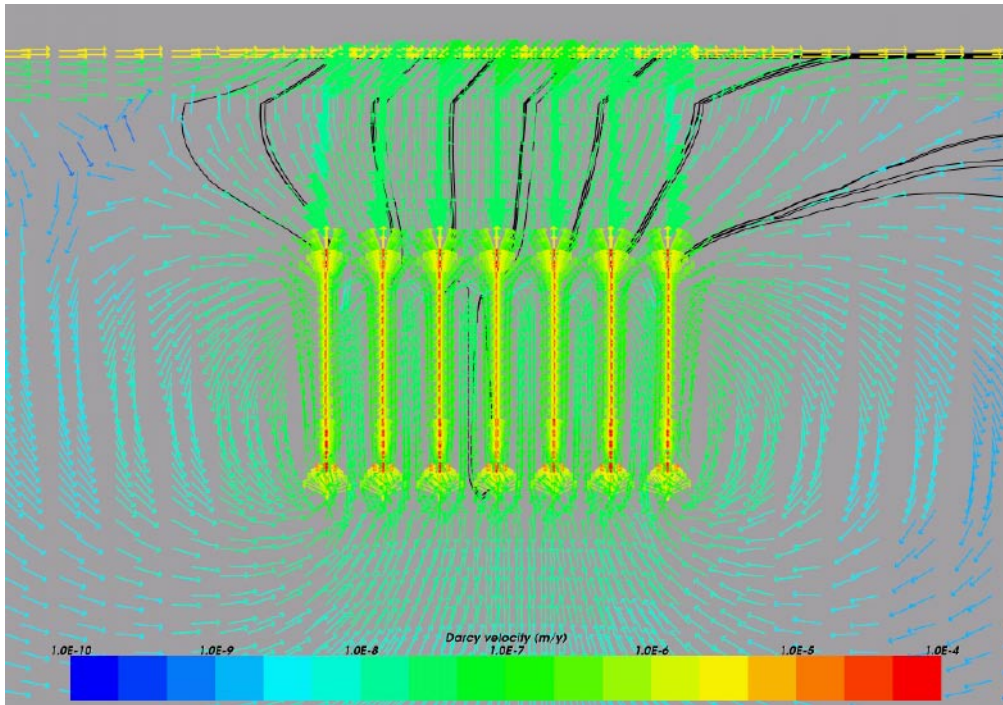
Figur 5-3. Genomsnittlig värmeutveckling per meter borrhål.



Figur 5-4. Flödesvektorer och flödeslinjer för ett basfall med konstant tryck på överytan och inga sprickzoner. Bilden visar flödesfältet 10 år efter deponering.

Från färgkodningen av flödesvektorerna ser vi att de beräknade Darcy hastigheterna är mycket låga och att värmeavgivningen bara förmår skapa strömning i borrhålen och den störda zonen.

Basfallet visar att med den ansatta modellen av berget och förvaret är endast värmeutvecklingen i bränslet inte är tillräckligt för att driva det salta djupa grundvattnet som har högre densitet än det ovan liggande söta grundvattnet mot ytan. I figur 5-5 visas motsvarande flödesfält när en gradient på 1 % applicerats på överytan. Flödesmönstret i bergets övre del är påverkat av gradienten på överytan. Det ska påpekas att på samma sätt som i föregående fall



Figur 5-5. Flödesvektorer och flödeslinjer för ett fall med 1 % tryckgradient längs överytan och inga sprickzoner. Bilden visar flödesfältet 10 år efter deponering.

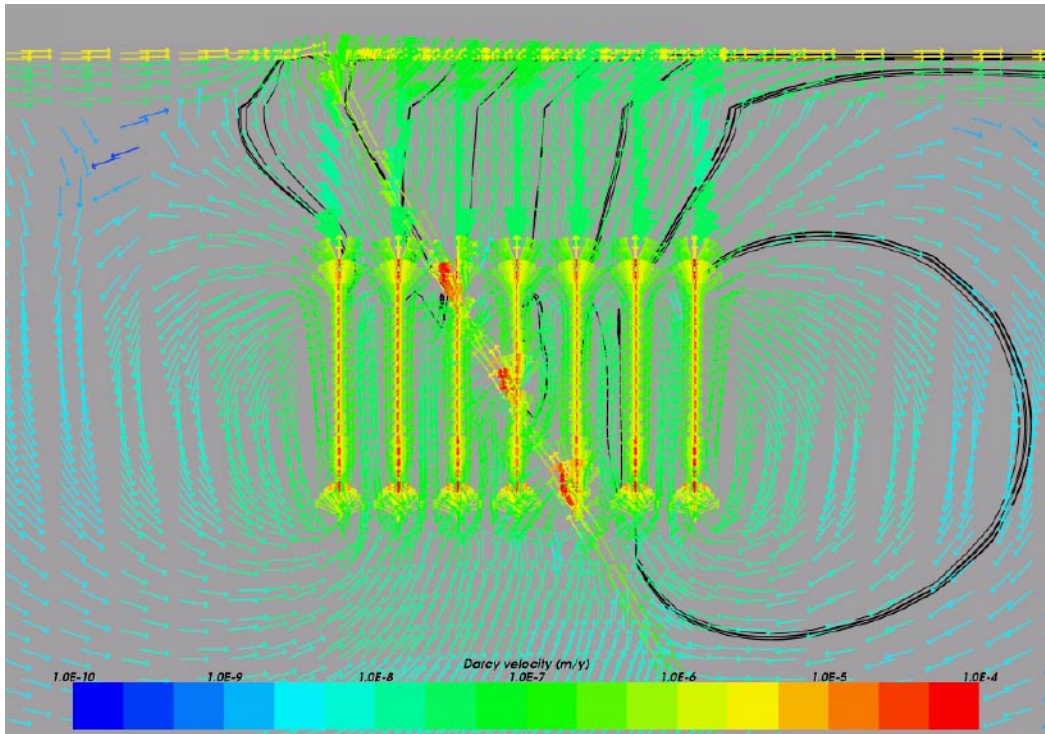
är de beräknade flödestiderna från det deponerade bränslet längs flödeslinjerna i så långa att beräkningarna saknar mening. Även det faktum att flödeslinjerna går upp till ytan istället för att som i föregående fall slutar i konvektionsceller saknar således reell mening.

De redovisade fallen visar att i en homogen bergmassa och med de ansatta förvarsegenskaperna räcker inte kombinationen värmeavgivning och hydraulisk gradient på ytan för att åstadkomma någon ur nuklidtransportsynpunkt väsentlig transport av vatten från det deponerade bränslet till ytan. I figur 5-6 redovisas flödesvektorer och flödeslinjer för ett fall där en sprickzon som stupar 60° åt höger genom slutförvarets centrum. De beräknade flödestiderna är i samma storleksordning även i detta fall. Man kan således konstatera att kombinationen värmeutveckling – gradient på ytan – sprickzon inte förmår driva det salta grundvattnet uppåt på ett sådant sätt att det leder till snabba transportvägar till det ytliga systemet. Frågan inställer sig då om de beräknade flödestiderna skulle bli väsentligt kortare om grundvattnet vore sött från början. Ett sådant fall redovisas i figur 5-7.

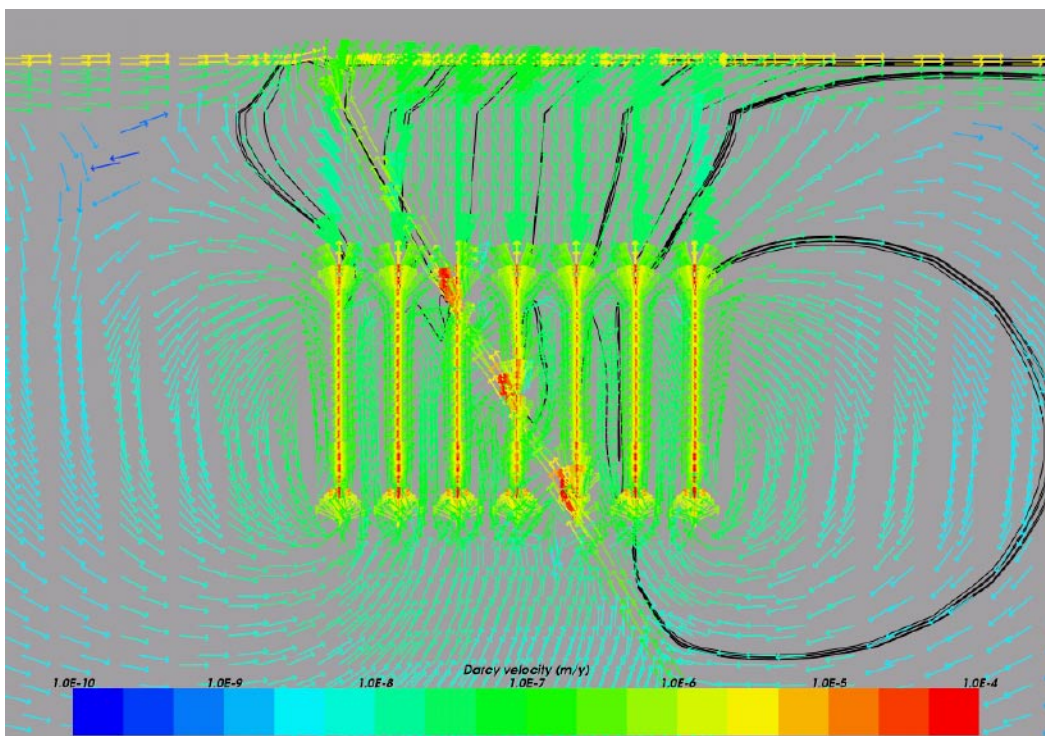
Även i det fall som redovisas i figur 5-7 med initialt sött grundvatten fås mycket låga flödes-hastigheter och beräknade gångtider som med flera tiopotenser överstiger varaktigheten av bränslets värmeavgivning. Det är uppenbart att med de antaganden som gjorts för denna modell blir den drivande kraften på förvarsdjup för liten för att den ska leda till en väsentlig transport av grundvatten till ytligare nivåer.

För att ytterligare utreda hur den drivande kraften beror av den geologiska situationen har en beräkning genomförts för ett fall där två regionala vertikala lineament uppströms respektive nedströms slutförvaret förbinds med en flack sprickzon som skär igenom hela förvaret, se figur 5-8. Även i detta fall fås mycket långa gångtider.

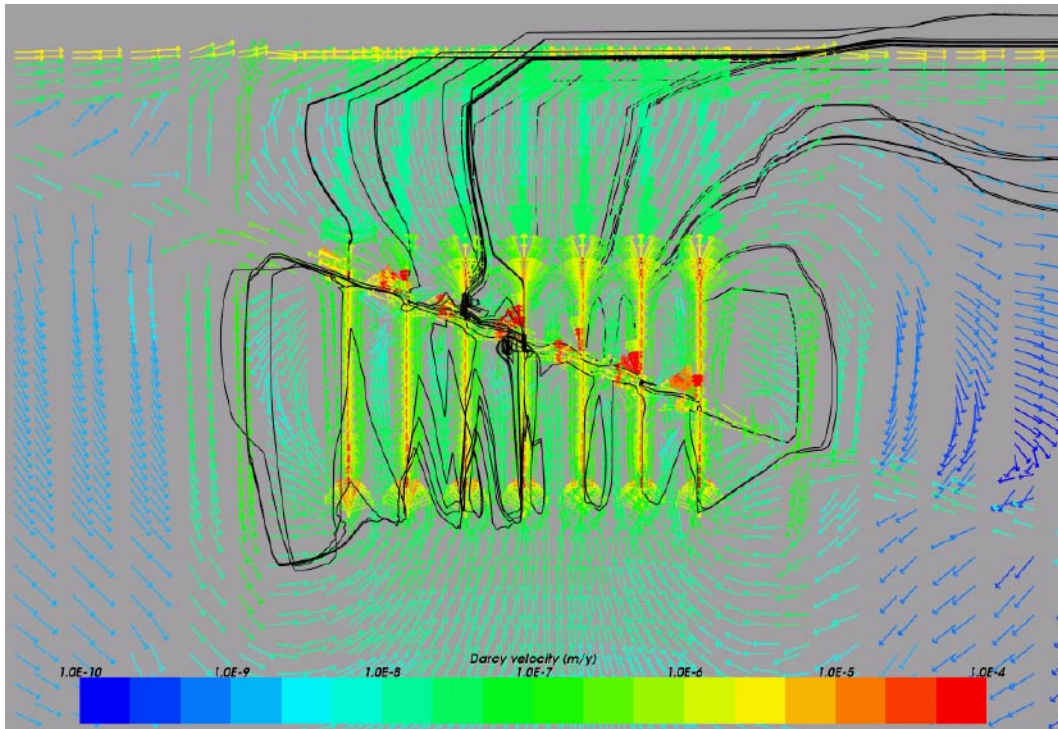
I figur 5-9 redovisas beräknade flödestider och flödeslinjernas längder för de ovan redovisade fallen. Som redan nämnts ovan är de beräknade flödestiderna i dessa fall så långa att om de vore sanna de är mycket längre än halveringstiden på de flesta radionukliderna och också längre än den tidsperiod på 100 000 upp till 1 million år som en långsiktig säkerhetsanalys omfattar.



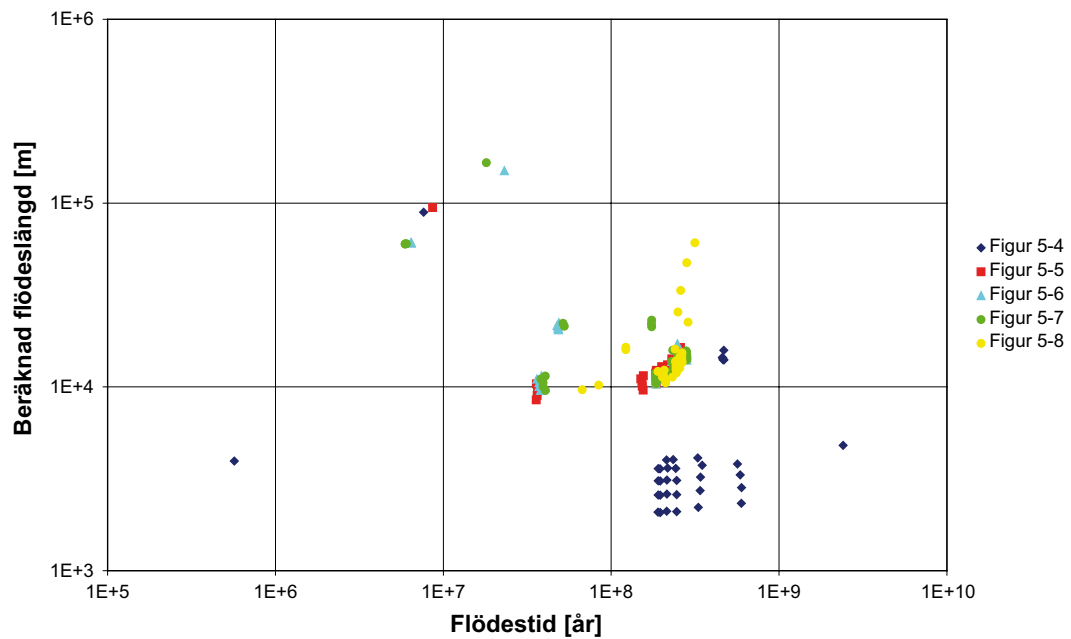
Figur 5-6. Flödesvektorer och flödeslinjer för ett fall med 1 % tryckgradient längs överytan och en sprickzon som stupar 60° åt höger i figuren. Bilden visar flödesfältet 10 år efter deponering.



Figur 5-7. Flödesvektorer och flödeslinjer för ett fall med 1 % tryckgradient längs överytan, en sprickzon som stupar 60° åt höger i figuren samt initialt sött vatten i hela modelldomänen. Bilden visar flödesfältet 10 år efter deponering.



Figur 5-8. Flödesvektorer och flödeslinjer för ett fall med 1 % tryckgradient längs överytan, en sprickzon som stupar 20° åt höger i figuren och som ansluter till vertikala sprickzoner på ömse sidor om slutförvaret. Bilden visar flödesfältet 10 år efter deponering.



Figur 5-9. Beräknade flödestider och flödeslängder för de fall som redovisats ovan

6 Förutsättningar för kravuppfyllnad

I avsnitt 1.3 redogörs för de krav och principer som SKB har ställt upp för ett slutförvars funktion utgående från lagkrav och krav från SKB:s ägare. I avsnitt 2 definieras de funktionskrav på slutförvarets olika delar som kan härledas från uppställda krav och principer. I detta avsnitt görs en genomgång utgående från dagens kunskapsläge av förutsättningarna för ett slutförvar enligt principen djupa borrhål att uppfylla de definierade funktionskraven. De definierade funktionskraven kan indelas i följande grupper som diskuteras nedan under separata rubriker:

- Krav på den långsiktiga funktionen av slutförvarets barriärer.
- Utformningskrav utgående från möjlighet att upprätthålla driftsäkerhet.
- Krav avseende begränsning av slutförvarets miljöpåverkan.
- Krav relaterade till flexibilitet och effektivitet.

Krav på långsiktig barriärfunktion

De definierade systemkraven på barriärernas långsiktiga funktion är:

- Slutförvaret ska isolera det använda kärnbränslet från biosfären.
- Om isoleringen bryts ska slutförvaret fördröja radionuklidtransport så att nukliderna då de slutligen når biosfären inte ger upphov till skada.
- Slutförvaret ska ha flera barriärer som enskilt och tillsammans ska bidra till och upprätthålla barriärfunktionerna.
- Slutförvarets system av barriärer och barriärfunktioner ska erbjuda skydd mot skadlig verkan av strålning så länge som krävs med hänsyn till det använda kärnbränslets radiotoxicitet.
- Slutförvarets barriärer ska vara passiva.
- Efter genomförd deponering ska slutförvaret vara tekniskt möjligt att försluta.
- Slutförvarets barriärsystem och fysiska skydd ska vara tåligt mot felfunktioner och förhållanden, händelser och processer som kan påverka deras funktioner.
- Metoder för uppförande, tillverkning, deponering, förslutning och oförstörande provning av slutförvarets barriärsystem ska vara tillförlitliga och driftstabila.
- Bland tekniskt genomförbara alternativa utformningar, tekniker och åtgärder ska de som i ett kort tidsperspektiv bäst begränsar stråldoser till människor och som i ett långt tidsperspektiv bedöms ha den bästa skyddsförmågan väljas.

Genomgången i denna rapport visar att det med dagens teknik och kunskap avseende deponeringsteknik inte går att säkerställa att kapslarna med det använda bränslet är täta när de har deponerats. Vidare kan man inte med dagens kunskap om deponeringsteknik inte säkerställa egenskaperna hos den buffert som ska omge de deponerade kapslarna. Borring och deponering medför dessutom en störning av det naturliga grundvattensystemet genom att sötvatten och ytaktiva ämnen förs ned i hålet. Dessa faktorer sammantagna medför att man vid bedömningen av den långsiktiga säkerheten i slutförvaret måste utgå från att ett antal av de deponerade kapslarna är otäta och att utläckande radionuklider kan nå grundvattnet i bergets sprickor utan att hindras väsentligt av närzonsbarriärer.

De genomförda beräkningarna av grundvattenströmningsförhållandena visar att med den modell som använts i beräkningarna blir transporttiderna för grundvattnet från deponeringshålen till markytan mycket långa. Känslighetsanalysen visar att vissa företeelser och betingelser skulle kunna korta av dessa transporttider väsentligt. Detta gäller främst fallet att deponeringshålet initialt är fyllt med sötvatten medan det omgivande grundvattnet är salt. I samtliga beräknade

fall är dock de beräknade grundvattentransporttiderna mycket långa och mycket längre än perioden för bränslets värmeavgivning och halveringstiden för de flesta radionuklider. Även om ett antal relevanta frågeställningar har belysts i beräkningarna bör det betonas att de genomförda beräkningarna ger en förenklad och översiktlig bild och inte kan jämföras med de beräkningar som skulle krävas i en säkerhetsanalys.

Eftersom det inte går att säkerställa att barriärerna i närzonen bidrar till att isolera och fördröja radionukliderna kommer hela bevisbördan vad gäller den långsiktiga säkerheten att vila på bergbarriären. Ett slutförvar enligt principen djupa borrhål uppfyller därför inte kravet att säkerhetsfunktionen ska upprätthållas av ett system av barriärer med skyddsfunktioner som kompletterar varandra. Vidare kan anläggningen inte anses vara robust och tillförlitlig dels eftersom osäkerheterna vad gäller bergbarriärens funktion är stora och dels på grund av att närzonsbarriärernas tillstånd efter deponering inte kan kontrolleras.

Slutsatsen av det ovan sagda blir att ett slutförvar enligt principen djupa borrhål kan ha förutsättningar att skydda människan och miljö mot skadlig strålning genom den isolerande och fördröjande effekt som fås av den förväntat långsamma grundvattenomsättningen på stora djup men att svårigheterna att bygga ett sådant förvar är stora. Den konceptuella bild som ligger bakom denna utsaga är dock grundad på begränsad geovetenskaplig information och en schematisk modellberäkning varför osäkerheten blir stor.

Krav för att upprätthålla driftsäkerhet

Följande systemkrav är främst att hänföra till driftsäkerheten under den tid då deponeringen och förslutningen pågår:

- Stråldoser till personal och andra som vistas i och i närheten av slutförvaret ska begränsas så långt det är rimligen möjligt.
- Åtgärder som är avsedda att underlätta återtag och övervakning får inte försämra slutförvarets säkerhetsfunktioner.
- Slutförvarets kärntekniska drift ska vara säker.
- Slutförvaret ska vara optimerat med hänsyn till radiologisk säkerhet och strålskydd.
- Slutförvaret ska vara väl skyddat mot intrång av obehöriga och olovlig befattningsmed kärnämne.

Eftersom deponerings- och återtagsteknik inte finns utarbetad idag är det inte möjligt att avgöra om åtgärder kan genomföras för att underlätta återtag utan att detta äventyrar säkerheten i förvaret. Då man i enlighet med vad som sagts ovan måste räkna med att ett antal kapslar kan var otäta efter deponering finns det en risk att främst buffertmaterialet i borrhålet relativt snabbt efter deponering blir kontaminerat med radioaktiva ämnen. Både detta och de skadade kapslarna själva motverkar möjligheten till att genomföra återtag.

Slutförvaret är en kärnteknisk anläggning där kärntekniskt material hanteras. Det är viktigt att anläggningen utformas och drivs på ett sådant sätt att det kärntekniska materialet inte sprids eller orsakar kriticitet. Det är även viktigt att anläggningen utformas och att hanteringen sker på ett sätt så att relevanta strålskydds krav innehålls samt att relevanta skyddsåtgärder införs så att intrång i anläggningen och tillgrepp av kärnämnen förhindras. Skyddsutrustning för strålskydd och kärnteknisk säkerhet måste dessutom anpassas till borrhålen eftersom denna med stor sannolikhet behöver användas vid deponeringen av kapslarna. Samtliga dessa frågor måste behandlas i detaljprojekteringen av en anläggning. Eftersom någon sådan inte är gjord finns det heller ingen möjlighet att i dag avgöra förutsättningarna för att lösa dessa frågor för djupa borrhål.

Krav på begränsning av miljöpåverkan

De systemkrav som kopplas till miljöpåverkan är:

- I en avvägning mellan långsiktig säkerhet och annan miljöpåverkan ska den plats som genom sin beskaffenhet och sitt läge bedöms mest lämpad för slutförvarets syfte, verksamhet och anläggningar väljas.
- Slutförvarets omgivningspåverkan (utsläpp till vatten och luft, buller m m) ska vara så liten som rimligen möjligt.
- Slutförvaret ska så långt rimligen möjligt vara resurssnålt vad gäller råvaror och energi.
- Produkter med liten inverkan på miljön ska om rimligt väljas och användas vid bygge och drift av slutförvaret.

Ett slutförvar enligt principen djupa borrhål tar jämfört med SKB:s huvudalternativ, KBS-3, relativt stora landarealer i anspråk. Vid varje borrhål krävs en anläggningsyta på i storleksordningen 1 hektar och hela slutförvaret består av 45 sådana anläggningar. Om terrängen och geologin på förlägningsplatsen medger att borrhålarna anläggs i ett rutnät med avståndet 500 meter mellan varje borrhål krävs en total markareal på cirka 10 km² för dessa 45 hål. Beroende på vilken deponeringshastighet man eftersträvar och kan uppnå kommer 5–10 borrhålsplatser att samtidigt vara i drift eller under anläggande.

Vid varje deponeringshål ska under olika skeden finnas en borrhög (60–80 meter hög), utrustning för uppsamling, avvattning och borttransport av borkax (cirka 5 000 m³/hål, kornstorlek lera/silt) blandat med det skum som används som borkvätska (innehåller tensider), utrustning för lagring och hantering av kapslar med använt bränsle (300 kapslar per hål med krav på strålskärning/fjärrstyrning), utrustning för fysiskt skydd (staket, TV-övervakning, röntgenutrustning för lastbilar), etc.

Krav på flexibilitet och effektivitet

Följande systemkrav hänför sig till krav på flexibilitet och effektivitet:

- Slutförvaret ska rymma allt använt kärnbränsle från det nu godkända svenska kärnkraftsprogrammet.
- Slutförvaret ska byggas och drivas under en begränsad tidsperiod anpassad till kärnkraftsverkens drifttid.
- Slutförvaret ska ha hög kvalitet och vara kostnadseffektivt.
- Påvisade brister i slutförvarets barriärer eller barriärfunktioner ska kunna korrigeras under bygg- och driftskedet.

De två första punkterna är designfrågor som måste lösas i samband med att ett slutförvar projekteras. De designparametrar som finns i denna process är antalet borrhål samt antalet borrhål som samtidigt är i drift. Den senare av dessa beror mycket starkt av hur snabbt man och problemfritt man kan föra ner kapslar i hålet. De sista punkterna är i dagsläget inte möjliga att behandla. Möjligheterna att kontrollera anläggningskvalitet är starkt begränsade eftersom man inte kan inspektera borrhålen på ett godtagbart sätt. Vilket medför att det även blir svårt att korrigera eventuella brister.

7 Slutsatser

Slutförvarskonceptet djupa borrhål innebär att kapslar med använt kärnbränsle deponeras ovanpå varandra på mellan 2 och 4 kilometers djup i borrhål. Det finns i dagsläget inte någon färdigutvecklad teknik för hur ett sådant slutlager ska byggas och drivas utan den genomgång som görs i denna rapport bygger på idéer som diskuterats de senaste drygt 15 åren. Deponering i djupa borrhål diskuteras för närvarande i Storbritannien och i det amerikanska programmet för deponering av plutonium från det militära programmet. I båda dessa sammanhang refereras till tidigare arbeten av SKB som varande det mest signifikanta bidraget till förståelsen av problemställningarna kring konceptet.

SKB har tidigare utrett slutförvarskonceptet djupa borrhål bland annat i Pass-studien /SKB 1992/ vad avser teknik, kostnader och säkerhet. Slutsatsen var då att konceptet djupa hål erhöll den lägsta rankningen av de undersökta alternativen beroende på att säkerheten vilar på endast en barriär (den geologiska), att kunskaperna om förhållandena på stora djup i den svenska berggrunden är starkt begränsad och att kostnaderna för detta alternativ bedömdes vara högre än för övriga undersökta alternativ.

På senare år har ett program för forskning och utveckling som skulle erfordras för att lyfta kunskapsläget till avseende djupa borrhål till samma nivå som i dagsläget råder för KBS-3-alternativet /SKB 2000a/. Slutsatsen var då att ett sådant program skulle ta 30 år i anspråk och kosta drygt fyra miljarder kronor.

I anslutning till framtagandet av detta program uppdrog SKB åt ett företag med erfarenhet av borrhållning av mycket djupa hål att ge sina synpunkter på de tekniska förutsättningarna för att i granit borra fyra kilometer djupa hål med en diameter av ~ 80 cm /Harrison 2000/. Slutsatsen var då "Författaren bedömer det möjligt att borra deponeringshålen med dagens teknik även om arbetet utgör en av de största utmaningarna för borrhållningsindustrin". Rapporten redovisar att borrhållning av denna typ i granit måste göras med hammarborrning.

Det finns idag ingen färdig teknik för hammarborrning med vanlig borrhållning som borrhållning. Utvecklingsarbete för att få fram sådan teknik pågick då rapporten skrevs men slutsatsen var att om tekniken inte kom fram inom två år skulle den inte komma fram alls eftersom det inte finns någon efterfrågan på sådan teknik. I rapporten rekommenderas istället att ett styvt skum används som borrhållning vilket dock innebär att man introducerar organiskt material i form av skumbildare samt luft i deponeringshålet. Med skum som borrhållning beräknas tidsåtgången för att borra och infodra ett 4 km djupt borrhål med diametern 80 cm i de understa 2 km till drygt 130 dagar. I denna tid ingår inte anläggning av vägar, byggande av rigg, borrhållning och loggning av pilothål, etc.

I den refererade studien av borrhållningsteknik redovisas även en potentiellt möjlig teknik för deponering av kapslarna. Det finns idag inga uppgifter om hur lång tid det skulle ta att deponera en kapsel med denna deponeringsteknik. Publicerade siffror på tidsåtgången bygger på bakåträkning av vad som skulle krävas för att uppnå en deponeringstakt som motsvarar den för KBS-3 planerade, det vill säga motsvarande 200 KBS-3-kapslar eller 600 kapslar av den typ som antagits i denna studie per år.

De geologiska, geotermiska, geohydrologiska och geokemiska förhållandena på stora djup har utvärderats av /Juhlin et al. 1998, Smellie 2004/. Av dessa utvärderingar framgår att vår uppfattning om förhållandena på flera kilometers djup bygger på information från ett fåtal borrhål som borrats i formationer vars egenskaper som kan förväntas avvika från dem som söks för slutförvaring. Den gängse uppfattningen är att såväl grundvattnets salthalt som temperaturen ökar med djupet. I flacka områden i södra Sverige kan dessa förhållanden förväntas vara stabila medan man i mer kuperade områden kan förvänta sig djupare inträngning av sötvatten från ytligare system.

Modellberäkningar inom denna studie visar liksom tidigare modellberäkningar att om dessa förhållanden kan visas vara stabila blir utbytet av vatten mellan det djupa systemet och mer ytliga system mycket begränsat. Det är därför inte meningsfullt att med dagens begränsade kunskap om förhållanden och processer på stora djup genomföra en mer detaljerad analys av utläckage av radionuklider under olika scenarieförutsättningar.

För att kunna genomföra en meningsfull säkerhetsbedömning av konceptet djupa borrhål skulle kunskapen om förhållandena på stora djup i svenskt urberg behöva undersökas ingående. Vidare krävs omfattande arbete för att utveckla och verifiera borrhållstekniken, depositionstekniken och förslutningstekniken.

Det finns idag ingen praktisk kunskap om hur kapslar och buffert ska appliceras och vilka egenskaper dessa efter deponering kan förväntas få. Det finns därför inget underlag för att tillmäta dessa barriärer någon förutsägbar effekt i en säkerhetsanalys. Fokus för slutförvarets säkerhet kommer därmed att hamna på den geologiska barriären vilket innebär att ett slutförvar enligt principen djupa borrhål med dagens kunskap får förutsättas vara ett slutförvar av enbarriärtyp.

8 Referenser

Agrenius, 2006. Bilaga till Petterson M och Grundfelt B, 2006. Förlängd lagring i Clab – beskrivning och uppdatering av kunskapsläget. SKB R-06-62, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Autio J, Kirkkomäki T, Siitari-Kauppi M, Timonen J, Laajalahti M, Aaltonen T, Maaranen, 1999. Use of ¹⁴C-PMMA and HE-gas methods to characterise excavation disturbance in crystalline rock. Äspö IPR-99-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Birgersson L, Skagius K, Wiborgh M, Widén H, 1992. Project Alternative Systems Study – Pass. Analysis of performance and long-term safety of repository concepts. SKB TR-92-43, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Claesson J, Hellström G, Probert T, 1999. 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.

Harrison T, 2000. Very deep borehole. Deutags opinion on boring, canister emplacement and retrievability. SKB R 00-35, 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. The Very Deep Hole Concept: Geoscientific appraisal of conditions at great depth. SKB TR-98-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Nirex, 2004. A review of the deep borehole disposal concept for radioactive waste. Nirex report no. N/108/, United Kingdom Nirex limited.

Marsic N, Grundfelt B, Wiborgh M, 2006. Modelling of thermal effects on groundwater flow for the VDH concept. SKB R-06-59, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 1992. Projekt AlternativStudier för Slutförvar (PASS). Slutrapport. Även utgiven på engelska. Project on Alternative Systems Study (PASS). Final report. SKB TR-93-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2000a. 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, 2000b. Samlad redovisning av metod, platsval och program inför platsundersöknings-skedet [Fud-K]. Även utgiven på engelska. Integrated account of method, site selection and programme prior to the site investigation phase. SKB TR-01-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2000c. Systemanalys. Val av strategi och system för omhändertagande av använt kärnbränsle. SKB R-00-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.

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

Smellie J, 2004. Recent geoscientific information relating to deep crustal studies SKB R-04-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.