

Förutsättningar för borring av och deponering i djupa borrhål

Anders Odén, QTOB

September 2013

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co

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



ISSN 1651-4416

SKB P-13-08

ID 1069822

Förutsättningar för borring av och deponering i djupa borrhål

Anders Odén, QTOB

September 2013

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

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

Förord

Denna statusrapport togs ursprungligen fram inför den hearing som KASAM arrangerade 14–15 mars 2007. Vid det tillfället togs rapporten, under ledning av Torbjörn Hugo-Persson (SKB), fram av följande personer: Per Tengborg (Golder Associates AB), Rune Glamheden (Golder Associates AB), Anders Odén (Sylog Consulting AB) och Håkan Sandstedt (Ramböll Sverige AB).

Rapporten har uppdaterats under år 2012 och 2013 för att ge en redovisning av aktuell status på teknik för deponering av använt kärnbränsle i djupa borrhål. Detta arbete har utförts av Anders Odén (QTOB).

Värdefull information om borrhåsteknikens status erhöles vid besöken hos Herrenknecht Vertical år 2007 och 2013. Dessutom fick SKB tillgång till de fotografier som återfinns i avsnitt 5.5.1.

Sammanfattning

I rapporten har erfarenheter från borrhningar till stort djup i kristallint berg sammanställts utgående från projektbeskrivningar, artiklar och personliga kontakter. Bergmekaniska effekter har analyserats. Vidare beskrivs förslag som framförts av SKB och andra instanser vad gäller deponering i och förslutning av djupa borrhål.

Kombinationen att borra både djupt och med stor diameter i kristallint berg har främst förekommit inom olika forskningsprojekt, såsom i det tyska KTB-projektet. Genom dessa projekt och det ökade intresset under senare år för geotermisk energi, finns idag utrustning som bedöms kunna användas för att borra 5 000 m djupa hål, med en håldiameter på 445 mm, i kristallint berg. Sådana hål skulle kunna användas för deponering av använt kärnbränsle.

Med den deponeringsteknik som nyligen har beskrivits av Sandia National Laboratories i USA bedömer SKB att det eventuellt skulle kunna gå att genomföra själva deponeringen till 5 000 m djup.

Med tanke på själva genomförandet, borrhning och deponering, och de långtgående kraven på kärnteknisk säkerhet och strålskydd bedöms en akilleshäl vara risken att fastna med kapselsträngen eller delar av den ovanför deponeringszonen utan att kunna få loss den.

Avslutningsvis kan konstateras att även om borrhningen och deponeringen skulle lyckas återstår dock fortfarande att verifiera att borrhålen med de deponerade kapslarna uppfyller de initiala kraven samt är långsiktigt säkra, något som ligger utanför denna rapport. Även analys av konsekvenserna av att kapselsträngen eller delar av den fastnar ovanför deponeringszonen ligger utanför denna rapport.

Summary

Experiences from drilling boreholes to large depths in crystalline rock have been compiled based on project descriptions, articles and personal contacts. Rock mechanical effects have been analysed. The report also describes proposals put forward by SKB and other organisations regarding disposal in and closure of deep boreholes.

Drilling of deep boreholes with large diameter in crystalline rock has primarily occurred in various research projects such as in the KTB-project in Germany. These projects and the increased interest in recent years for geothermal energy have contributed to development of drilling equipment. Therefore, equipment is available that is expected to be used to drill 5,000 m deep boreholes, with a diameter of 445 mm, in crystalline rock. Such boreholes could be used for the disposal of spent nuclear fuel.

SKB's opinion is that the deposition technique recently described by Sandia National Laboratories in the United States could possibly be used to dispose spent nuclear fuel in 5,000 meter deep boreholes.

Given the actual implementation, drilling and disposal, and the far-reaching demands for nuclear safety and radiation protection, an Achilles heel is considered to be risk to get stuck with a canister above the deposition zone, without being able to retrieve it.

In summary, although the drilling and the deposit would succeed it still remains to verify that the boreholes with the deposited canisters meet the initial requirements and long-term safety, something that is beyond the scope of this report. Furthermore, analyzing the implications of a canister that has got stuck above the deposition zone also lies outside the scope of this report.

Innehåll

1	Inledning	9
2	Tidigare utredningar	11
2.1	SKB	11
2.2	Övriga	11
2.3	Omfattning och avgränsningar	12
3	Konceptet djupa borrhål	13
3.1	Utgångspunkter	13
3.2	Konceptbeskrivning enligt SKB:s PASS-studie	13
3.3	Senare konceptbeskrivningar	13
3.4	Utgångspunkten för denna statusrapport	15
4	Bergmekaniska aspekter och överväganden	17
4.1	Spänningstillstånd och temperatur mot djupet	18
4.1.1	Spänningstillstånd	18
4.1.2	Temperaturgradient	19
4.2	Bergmassans mekaniska egenskaper	19
4.3	Bergmekanisk analys	21
4.3.1	Utfall ur borrhålsväggen	21
4.3.2	Borrhålsdeformationer	22
4.3.3	Krypdeformationer	23
4.4	Slutsatser	24
5	Borrning	25
5.1	Kritiska parametrar	25
5.1.1	Borrhålsstabilitet	25
5.1.2	Mekanisk påverkan på grund av borrning	25
5.1.3	Rakhet och vertikalitet	25
5.1.4	Temperatur	25
5.2	Referensprojekt	26
5.2.1	Kola, världens djupaste borrhål 12 261 m	26
5.2.2	Siljansborrningen	27
5.2.3	KTB – Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschlands	39
5.2.4	Geotermiprojekt i Frankrike – Soultz	44
5.2.5	Geotermiprojekt i Schweiz – Basel	45
5.2.6	Lund Djupgeotermi (DGE#1)	46
5.2.7	Vetenskaplig borrning i Outokumpu 2 516 m	51
5.2.8	Erfarenheter från referensprojekten	53
5.3	Andra intressanta projekt	53
5.3.1	Schakt	53
5.3.2	Borrning i USA och Sovjetunionen/Ryssland för deponering av radioaktivt material samt för militära ändamål	54
5.4	Borrteknik	55
5.4.1	Borrmetoder	55
5.4.2	Styrning	57
5.4.3	Grenade borrhål	57
5.4.4	Borrkronor	60
5.5	Ny borrteknik	60
5.5.1	Herrenknecht Vertical GmbH	60
5.5.2	IRIS	62
5.6	Kostnader	63
5.7	Risker/osäkerheter	63

5.8	Tillämplighet med avseende på konceptet djupa borrhål	64
5.8.1	Siljansborrningen och KTB-projektet	64
5.8.2	Lunds djupgeotermi (DGE#1)	64
5.8.3	Oljeindustrin (Norge)	64
6	Deponering	65
6.1	Metodbeskrivning SKB	65
6.1.1	Buffert	65
6.1.2	Kapselplacering	65
6.1.3	Förslutning	66
6.1.4	Återtag	66
6.1.5	Risker/osäkerheter	66
6.2	Metodbeskrivning Sandia	67
6.2.1	Kapselplacering	67
6.2.2	Förslutning	67
6.2.3	Risker/osäkerheter	67
7	Slutsatser	71
	Liten ordlista	72
	Referenser	73

1 Inledning

Denna statusrapport om borrhning av och deponering i djupa borrhål togs ursprungligen fram inför den hearing som KASAM (nuvarande Kärnavfallsrådet) arrangerade 14–15 mars 2007. Dokumentet har under år 2012 och 2013 uppdaterats med ny information och nya erfarenheter när det gäller borrhning och deponering från åren 2007 till 2013 för att återspegla aktuell status på tekniken. Dessutom besöktes Herrenknecht Vertical, som utvecklar och tillverkar borrhtröstning, våren 2013.

Våren 2009 beslöt Obama-administrationen i USA att anslå 197 miljoner US \$ för att undersöka alternativ till Yucca Mountain, och våren 2010 stängdes Yucca Mountain. I januari 2010 tillsattes Blue Ribbon Commission med uppgift att komma med förslag på hur USA skall ta hand om sitt högaktiva kärnavfall. Detta har ökat intresset i USA för alternativet deponering i djupa borrhål. Under åren 2009 och 2011 har Sandia National Laboratories på uppdrag av Energidepartementet i USA (DOE) publicerat rapporter med förslag till hur borrhning av djupa borrhål och deponering av kärnavfall i dessa skulle kunna gå till. Energidepartementet har också låtit Sandia ta fram förslag på hur borrhningen av geotermiska borrhål i kristallint berg skall bli effektivare och billigare (Polsky et al. 2008). I sammanhanget kan noteras att Nuclear Waste Technical Review Board (NWTRB) i brev till Energidepartementet i USA (DOE), daterat 18 april 2012 (<http://www.nwtrb.gov/corr/bjg168.pdf>), ber DOE att inte prioritera djupa borrhål, vilket måste tolkas som att NWTRB är tveksamma till metoden. Samma tveksamhet framförs i ett annat brev från NWTRB till DOE daterat 30 juli 2013 (<http://www.nwtrb.gov/corr/rce010.pdf>), där NWTRB framför att forskning relaterad till djupa borrhål inte ska försena den högre prioriterade forskningen för ett byggt geologiskt förvar. NWTRB:s inställning till djupa borrhål framgår även av det faktablad som finns på deras webbplats (NWTRB 2013).

Tekniken att borra geotermiska hål är likartad med tekniken att borra deponeringshål för kärnavfall, det vill säga grova borrhål i kristallint berg till stort djup. Det ökade intresset för förnybara och uthålliga energikällor har ökat intresset för geotermisk energi vilket medfört ökad borrhning av djupa geotermiska borrhål i hårt kristallint berg. Det finns således flera incitament att utveckla teknik och utrustning för borrhning av den typ av hål som skulle krävas för deponering av kärnavfall i djupa borrhål.

2 Tidigare utredningar

2.1 SKB

SKB har arbetat med förvarskonceptet djupa borrhål under lång tid. För cirka 25 år sedan inleddes arbetet med framtagande av ett koncept och därefter har ett antal utredningar studerat olika aspekter av lagringstekniken. I SKB:s rapporter ”Djupa borrhål – Status och analys av konsekvenserna vid användning i Sverige” (Grundfelt och Wiborgh 2006) och ”Jämförelse mellan KBS-3-metoden och deponering i djupa borrhål för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle” (Grundfelt 2010), redogörs för tidigare genomförda utredningar där de huvudsakliga är:

- En förstudie avseende deponering i djupa borrhål (Juhlin och Sandstedt 1989).
- En jämförelse av olika alternativa system och tekniska lösningar för djupförvaring av använt kärnbränsle 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 entreprenörsstudie avseende genomförande av borrhål, deponering och återtag (Harrison 2000).

Förhållanden 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 civila litteraturen efter 1998 (Smellie 2004).

2.2 Övriga

Slutförvaring av använt kärnbränsle i djupa borrhål har även studerats av andra aktörer. Under senare år har rapporter om deponering i djupa borrhål kommit från Storbritannien, Kanada och USA. Huvudsakligen diskuteras deponering av speciella avfallstyper med små volymer, till exempel plutonium från skrotning av kärnvapen. Centrala rapporter i dessa arbeten redovisas nedan:

- En granskning av utvecklingen av djupa borrhålskoncept 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.
- Behandlar konceptet djupa borrhål för Storbritanniens del och konstaterar att konceptet, under vissa förutsättningar, kan ha trovärdighet, men att ett stort utvecklingsarbete skulle krävas, både vad gäller borrhålskoncept och teknik för deponering (Beswick 2008).
- Studie från Storbritannien där tolv olika koncept för geologisk deponering beskrivs, bland annat deponering i djupa borrhål (Baldwin et al. 2008).
- Kanadensisk studie där det konstateras att konceptet djupa borrhål skulle kräva mycket forskning och utveckling för att få kunskapen till samma nivå som finns för ett KBS-3-liknande förvar (Jackson och Dormuth 2008, Toth 2011).
- Rapport från USA, Sandia, där det föreslås att hålen ska vara fem kilometer djupa med 445 millimeters diameter på förvarsdjup. Sådana hål kan enligt rapporten borras med befintlig borrhålsutrustning av den typ som används vid borrhål av geotermiska borrhål (Polsky et al. 2008, Brady et al. 2009).
- Rapport från USA, Sandia, som bland annat behandlar tänkt deponeringsförfarande i djupa borrhål (Arnold et al. 2011).

2.3 Omfattning och avgränsningar

Denna statusrapport redovisar den aktuella kunskapsnivån avseende borrhning av djupa borrhål med förhållandevis stor diameter. Deponering belyses och kommenteras utifrån tidigare SKB-utredningar och från de senaste årens förslag från framför allt Sandia National Laboratories.

Avgränsningar:

- Borrhning utgår från ny information utanför SKB-sfären (geotermi etc) och tillgängliga rapporter.
- Deponering baseras i första hand på äldre SKB-rapporter samt tämligen nya rapporter från Sandia National Laboratories.
- Borrhålens diameter antogs i tidigare rapporter ofta vara cirka 800 mm (huvudalternativ för Juhlin och Sandstedt 1989). I senare rapporter diskuteras borrhål med 445 mm diameter. Det bedöms möjligt att borra med denna diameter till erforderligt djup med befintlig utrustning och ändå rymma kapslar med PWR.
- De kostnadsuppgifter som nämns i denna statusrapport ska betraktas som mycket ungefärliga och osäkra.
- Rapporten behandlar inte frågor om strålsäkerhet vare sig under deponering eller på lång sikt. Dessa frågor behandlas bland annat i Grundfelt (2010).

3 Konceptet djupa borrhål

3.1 Utgångspunkter

Olika aktörer har under åren tagit fram förslag till hur deponering i djupa borrhål skulle kunna utföras. Översiktligt innebär dessa förslag att:

- Det använda kärnbränslet kapslas in i lastbärande och vattentäta kapslar.
- Kapslarna deponeras i borrhål på 2 000–5 000 meters djup i en miljö med vatten med hög salthalt och låg grundvattenomsättning i kristallin berggrund.
- Borrhålet förses med en infodring (foderrör) för att deponering ska kunna genomföras på ett betryggande sätt.
- 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.
- Återtag av kapslar bedöms kunna vara möjligt under själva deponeringsfasen, men antas inte vara genomförbart sedan hålet förslutits. Detta eftersom det bedöms möjligt att återta kapslar innan foderröret tagits bort och hålet pluggats.

3.2 Konceptbeskrivning enligt SKB:s PASS-studie

I det koncept som presenterades i PASS-studien (SKB 1992), kapslas det använda bränslet in i kapslar med en ytterdiameter av 0,5 meter som var och en rymmer fyra bränsleelement från kokarreaktorer (BWR) alternativt ett bränsleelement från tryckvattenreaktorer (PWR). Detta kräver borrhål med en diameter av 800 millimeter. Kapslarna staplas ovanpå varandra i en deponeringszon mellan två och fyra kilometers djup, se figur 3-1. I ett deponeringshål rymms på detta sätt omkring 300 kapslar vilket innebär att det krävs cirka 60 deponeringshål för att rymma det använda bränslet från referensscenariot med 50–60 års drift av de svenska kärnkraftverken.

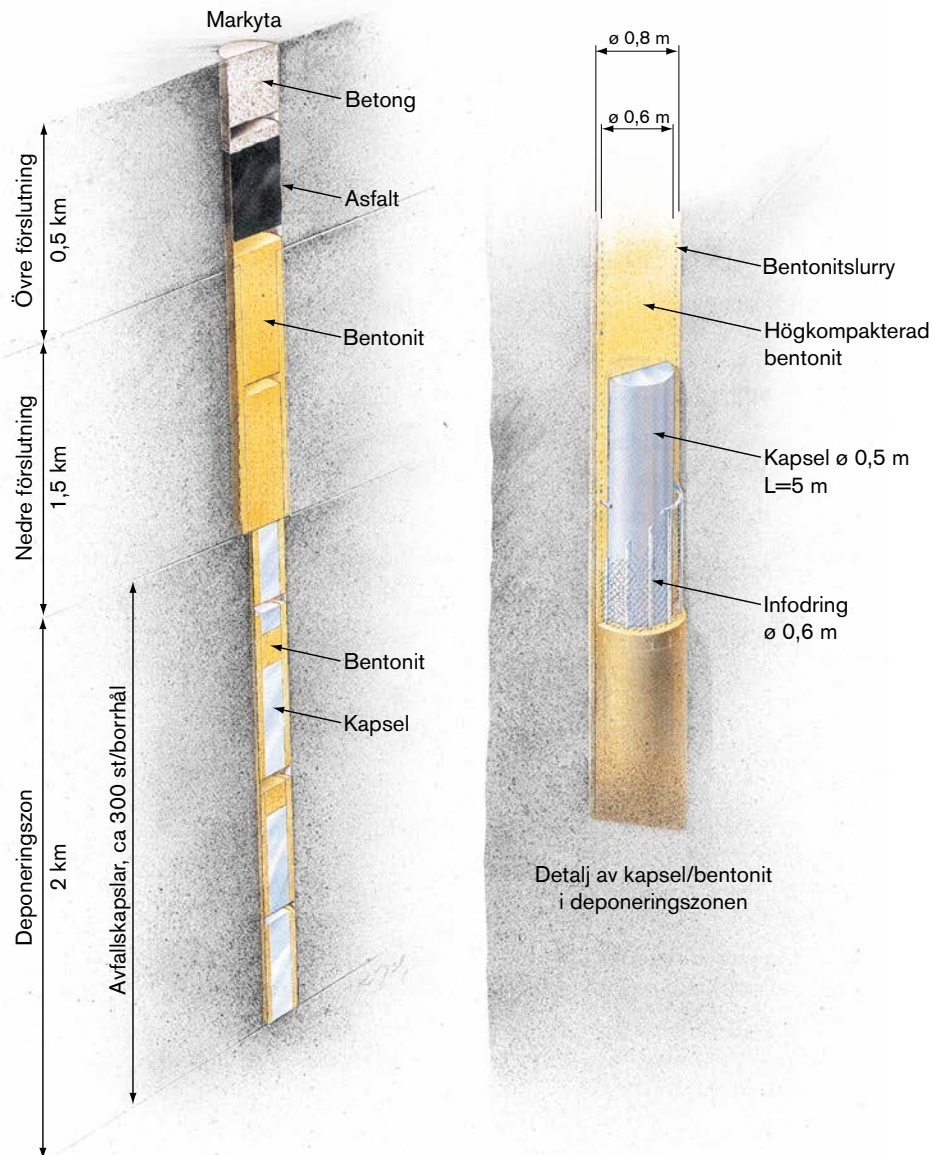
Konceptet djupa borrhål bygger på en säkerhetsstrategi i vilken större vikt läggs på den geologiska barriären i förhållande till ingenjörbarriärerna i KBS-3-konceptet.

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 för 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.

Det använda kärnbränslet innesluts i kapslar som antas förbli täta cirka 1000 år. Kapslarna omges av en buffert bestående av en blandning av bentonit och en deponeringsslurry. Buffertens funktion är att hålla kapslarna på plats, att motverka nuklidtransport i borrhålet och 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 flödestransporten på förvarsdjup är mycket begränsad.

3.3 Senare konceptbeskrivningar

Under 2000-talet har flera förslag framkommit om att deponering i djupa borrhål bör ske på 3–5 km djup i kristallint berg (Brady et al. 2009, Arnold et al. 2011, Åhäll 2011). Grunden för detta är att på dessa djup har berget låg permeabilitet och grundvattnet hög salthalt vilket ger en stabil densitetsskiktning. Dessutom medför det större djupet ökad säkerhetsmarginal mot yttre påverkan. Kristallint berg på detta djup är vanligt förekommande, ofta täckt av sedimentärt lager. Samtidigt är detta ett håldjup som är möjligt att borra med befintlig teknik och befintlig borrhålsutrustning med en bottendiameter på 445 mm (17½”).



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

I Sandias rapport från år 2011 (Arnold et al. 2011) föreslås en borrad bottendiameter på 432 mm (17") med ett foderrör (casing) som har ytterdiameter 340 mm och innerdiameter 316 mm. Deponeringskapslarna har då maximal ytterdiameter 302 mm (kopplingen) och maximal innerdiameter 211 mm. Med dessa dimensioner bedömer Sandia att kapslarna klarar trycket på 5 000 m djup och vikten från ovanpåliggande kapslar. I gengäld blir innerdiametern så liten att man måste ta isär PWR bränsleelementen (302 mm) och plocka ut stavarna för att packa dem i kapseln. BWR bränsleelementen (198 mm) däremot skulle få plats utan att plockas isär, men föreslås också tas isär för att kapslarna skall fyllas utan tomrum.

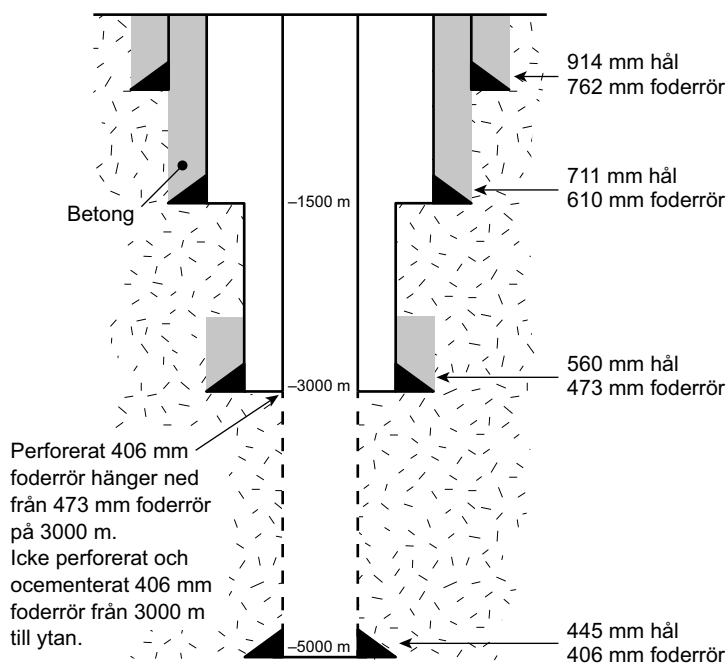
Då är kanske dimensionerna som föreslås i Hoag (2006) och Brady et al. (2009) att föredra. Håldiametern är 445 mm och foderröret har ytterdiameter 405 mm och innerdiameter 380 mm. Här har kapslarna ytterdiameter 340 mm och innerdiameter 316 mm vilket gör att ett PWR bränsleelement (302 mm) får plats utan att tas isär, alternativt 2 st BWR bränsleelement (313 mm). I gengäld kan kapseln då behöva fyllas med bentonitpulver eller kiselkarbid för att klara trycket utifrån. För att kapslarna vid fritt fall i hålet skall få samma begränsade hastighet som i Arnold et al. (2011) så bör kapslarna

föreses med kopplingar med ytterdiameter av cirka 366 mm. Jämfört med Arnold et al. (2011) så innebär det färre bränslestavar per kapsel och flera borrhål krävs för att rymma det radioaktiva avfallet. I gengäld slipper man den riskfyllda operationen med att ta ut bränslestavarna ur bränsleelementen.

Beträffande kapslarna så är bedömningen i Hoag (2006), Brady et al. (2009) och Arnold et al. (2011) att kapslarna skall vara robusta så att de säkert klarar deponeringsfasen och tillslutningen. Däremot anser författarna att det inte behövs något långlivat korrosionsskydd av kapseln på plats nere i deponeringszonen eftersom det är den geologiska barriären, med det stillastående salta vattnet, som skall förhindra läckage av radioaktiva ämnen. Man väljer då att tillverka kapslarna av stålrör av typer och dimensioner som används av och är utvecklade för borrhustrin.

3.4 Utgångspunkten för denna statusrapport

Denna statusrapport utgår från att 5 kilometer djupa hål, med en diameter i deponeringszonen av 445 mm, borrar i enlighet med de rekommendationer som ges av Brady et al. (2009), Arnold et al. (2011) och Åhäll (2011). I Sandias rapport från år 2011 (Arnold et al. 2011) antas att bränsleelementen plockas sönder och att bränslestavarna packas i kapseln. För de förhållanden som gäller i Sverige anser SKB att detta förfarande är olämpligt. Det skulle innebära en avsevärd arbetsinsats som dessutom skulle leda till ökad dosbelastning för personalen. I denna statusrapport antas därför att en kapsel rymmer ett PWR element alternativt två BWR element, i enlighet med beskrivningen i Brady et al. (2009).



Figur 3-2. Borrhålsutformning baserad på Arnold et al. (2011) och Brady et al. (2009). Observera att figuren inte är skalenlig.

4 Bergmekaniska aspekter och överväganden

I detta avsnitt behandlas bergmekaniska aspekter som kan ha konsekvenser för lagringen av använt kärnbränsle i djupa borrhål ned till 5 km djup. Bergmekaniska överväganden är av vikt inom lagringskonceptets samtliga faser, d v s vid borrning av deponeringshålet, vid installation av foderrör, vid deponering av kapslar samt vid eventuellt återtag av kapslar.

De aspekter som behandlas är sådana som inverkar på borrhålets stabilitet och dess deformation. Stabiliteten och deformationen i djupa borrhål beror av flera faktorer såsom:

- hålets dimension och infodring,
- borrhingsmetod och borrhingsprocedur,
- bergmassans mekaniska egenskaper,
- spänningstillståndet i bergmassan,
- bergmassans temperatur,
- omgivande grundvattentryck.

Borrhålets dimension och infodring är av mindre betydelse i avsnitt med massivt sprickfattigt berg, men i avsnitt med kraftigt uppsprucket berg har dessa parametrar stor betydelse både för borrhålets stabilitet och dess deformation. Inverkan av dessa faktorer berörs dock inte ytterligare utan borrhålets dimension och infodring har antagits i enlighet med kapitel 3.

Borrhingsmetoden och använd procedur inverkar på borrhålets stabilitet och deformation på så sätt att de bergmekaniska förhållandena antingen kan förbättras eller försämrats. Exempelvis kan borrhålets hydrostatiska tryck ha en stabiliserande inverkan på borrhålsväggen. Men infiltration av borrhåtsvätska i existerande sprickor kan å andra sidan orsaka tillkommande stabilitetsproblem. Vidare kan de temperaturvariationer som förekommer vid borrhningen medföra höga tillskottsspänningar och inducera termisk mikrosprickbildning i det omgivande berget (Sperber 1994). Dessa faktorer berörs dock inte ytterligare här utan beskrivs istället i kapitel 5.

När det gäller bergmassans mekaniska egenskaper så kan dessa uppvisa betydande variationer utmed borrhålet. Bergmassans mekaniska parametrar ändras även med djupet på grund av att spänningstillståndet och bergmassans temperatur ökar mot djupet (Juhlin et al. 1998). Bergmassans kvalitet är av avgörande betydelse för borrhålets stabilitet och deformation och de bergmekaniska frågeställningarna är i viss mån olika beroende av dess kvalitet. I den fortsatta beskrivningen har därför en uppdelning gjorts mellan bergmekaniska konsekvenser i massivt sprickfattigt berg och i kraftigt uppsprucket berg, se avsnitt 4.2.

Vid bergmekaniska bedömningar utgör normalt det rådande spänningstillståndet i berggrunden en av de viktigaste faktorerna. Så är även fallet vid djupa borrhål där primärspänningarnas magnitud förväntas vara mycket höga på 5 km djup. Vilket värde magnituden har på dessa djup är dock osäkert eftersom antalet observationerna är få från stora djup. Spänningstillståndet beskrivs utförligare under avsnitt 4.1.

När det gäller temperaturen i bergmassan är denna faktor av betydelse eftersom en ändring kan ge en indirekt inverkan på de mekaniska egenskaperna samtidigt som det sekundära spänningsfältet kring borrhålet kan öka. Temperaturen förväntas öka med djupet. Det finns dock viss osäkerhet i hur stor gradienten är mot djupet (Juhlin et al. 1998).

Grundvattentrycket slutligen är av betydelse eftersom det reducerar totalspänningarna kring borrhålet i en uppsprucken bergmassa.

4.1 Spänningstillstånd och temperatur mot djupet

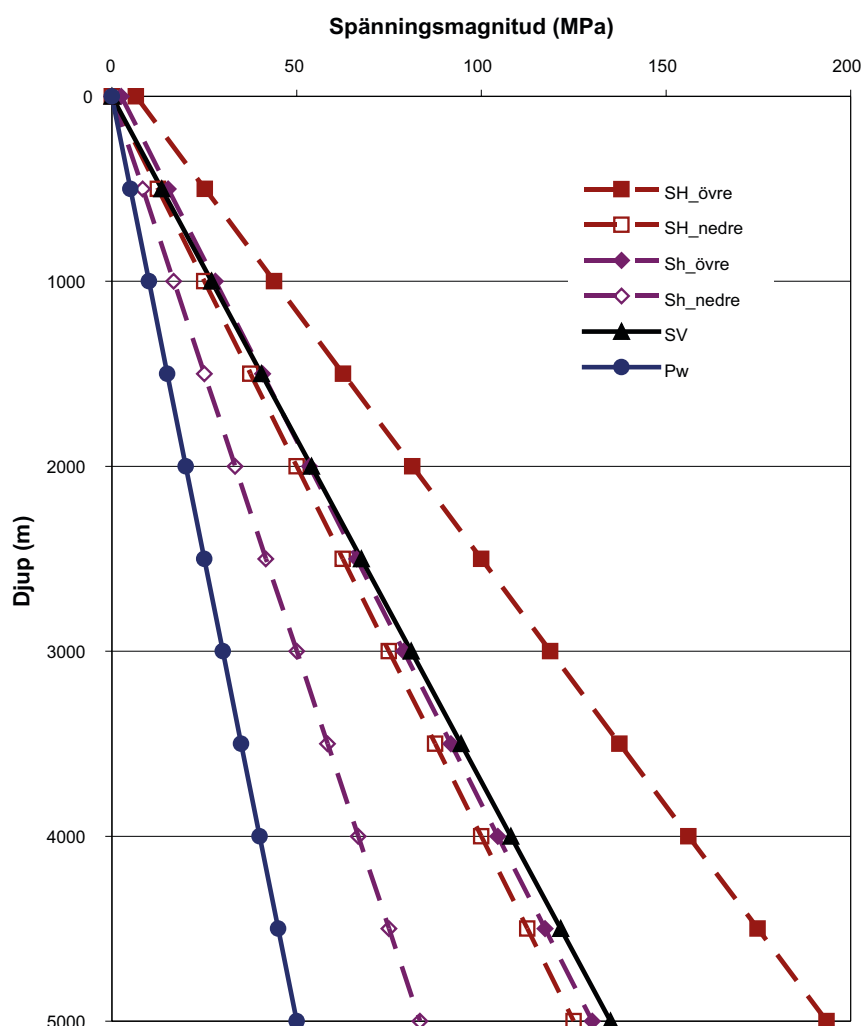
4.1.1 Spänningstillstånd

Spänningsdata från stort djup är sällsynta och de data som trots allt finns kan antas innehålla större fel än normalt. Spänningstillståndet på stort djup måste därför uppskattas genom att extrapolera resultaten från grundare djup.

Juhlin har gjort ett försök (Juhlin et al. 1998) att ange övre och nedre gränser för hur spänningstillståndet kan tänkas öka mot djupet i den Baltiska skölden. Uppskattade gradienter och magnituder för spänningstillståndet i Sverige ned till 5 km djup redovisas i tabell 4-1 respektive figur 4-1. Spänningstillståndet antas vara anisotropiskt med en kvot på ungefär 1.5 mellan minsta och största huvudspänning i horisontalled. Största huvudspänningen i horisontalled antas ha en magnitud som ligger i intervallet 125–195 MPa på 5 km djup. Detta medför att de inducerade randspänningarna kring ett borrhål kan förväntas uppgå till mellan 385–500 MPa på samma djup.

Tabell 4-1. Uppskattade gradienter för spänningstillståndet i den Baltiska skölden baserat på observationer ned till 1 000 m djup (Juhlin et al. 1998).

	Övre gräns (MPa)	Nedre gräns (MPa)
Största horisontella huvudspänningen (SH)	$6.5+0.0374*Z$	$0.0250*Z$
Minsta horisontella huvudspänning (Sh)	$2.5+0.0255*Z$	$0.0167*Z$
Vertikal huvudspänning (Sv)	$0.027*Z$	$0.027*Z$



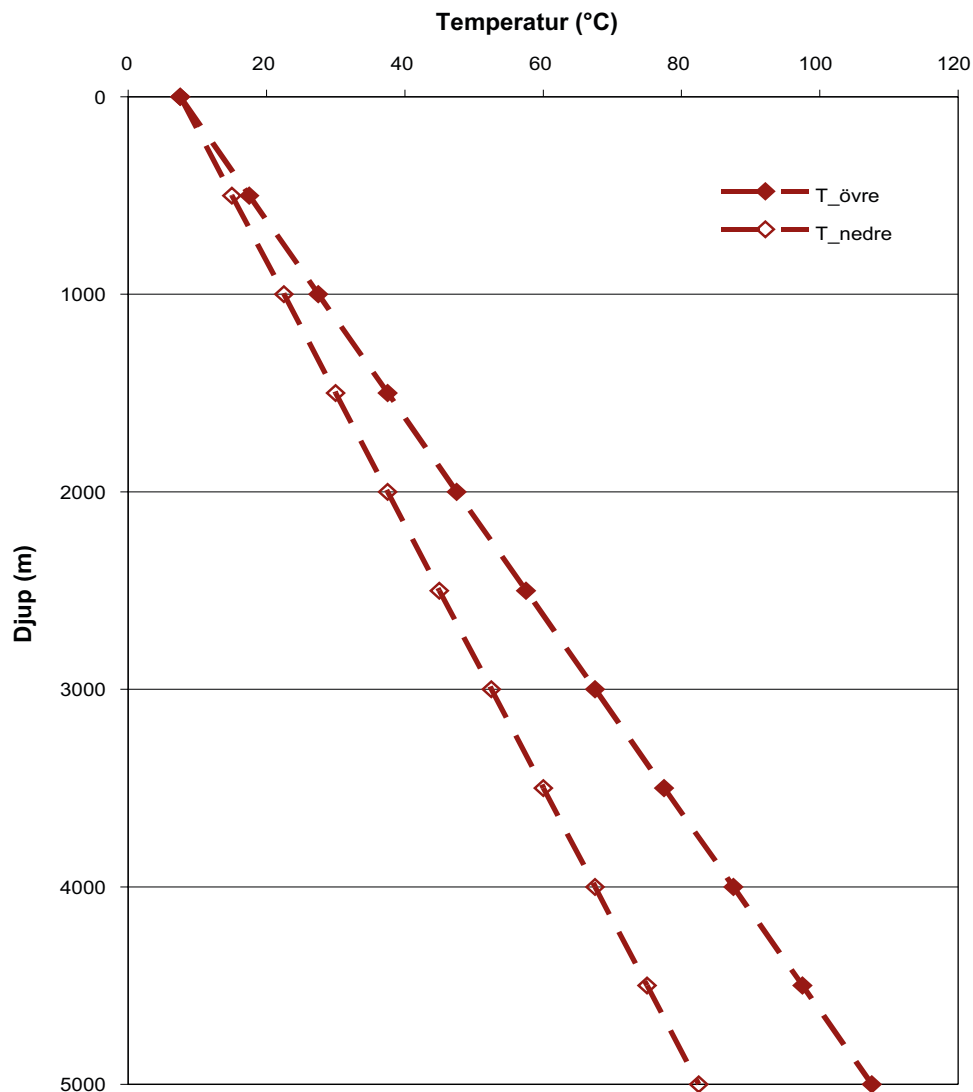
Figur 4-1. Uppskattade magnituder för spänningstillståndet i Sverige i den Baltiska skölden ned till 5 000 m djup. För jämförelse är även det hydrostatiska vattentrycket Pw inkluderat i diagrammet. Modifierad efter Juhlin et al. (1998).

4.1.2 Temperaturgradient

Temperaturgradienten i berggrunden är beroende av förekommande bergarter och litologin. Temperaturmätningar i borrhålet Gravberg-1, vid vad som bedömdes som stationära tillstånd i borrhålet, påvisade en temperaturgradient kring 16 °C/km i Siljanområdet (Juhlin och Sandstedt 1989). Mätobservationer i borrhål ned till 1 000 m i Forsmark indikerar en gradient på 12 °C/km och observationer i Simpevarp en gradient kring 15 °C/km (SKB 2005a, b). Baserat på dessa mätningar verkar det rimligt att anta en temperaturgradient i intervallet 15–20 °C/km i Sverige vilket ger temperaturområdet som redovisas i figur 4-2. Bergmassans temperatur på 5 km djup förväntas ligga i intervallet 80–100 °C.

4.2 Bergmassans mekaniska egenskaper

För att åskådliggöra de bergmekaniska aspekterna på ett konkret sätt kommer diskussionen att föras utifrån antagande om två typiska berggrundsförhållanden som kan tänkas uppträda längs borrhålet. Det ena berggrundsförhållandet utgörs av en massiv sprickfattig bergmassa av god kvalitet (Geological Strength Index, GSI=80) och det andra berggrundsförhållandet av en kraftigt uppsprucken bergmassa av dålig kvalitet (GSI=50). Massivt sprickfattigt berg kommer troligen att ha relativt stor förekomst längs borrhålet. Kraftigt uppsprucket berg förväntas endast uppträda i begränsade sprickzoner.



Figur 4-2. Uppskattad temperatur i Sverige i den Baltiska skölden ned till 5 000 m djup baserat på resultat redovisade i Juhlin och Sandstedt (1989) samt SKB (2005a) och SKB (2005b).

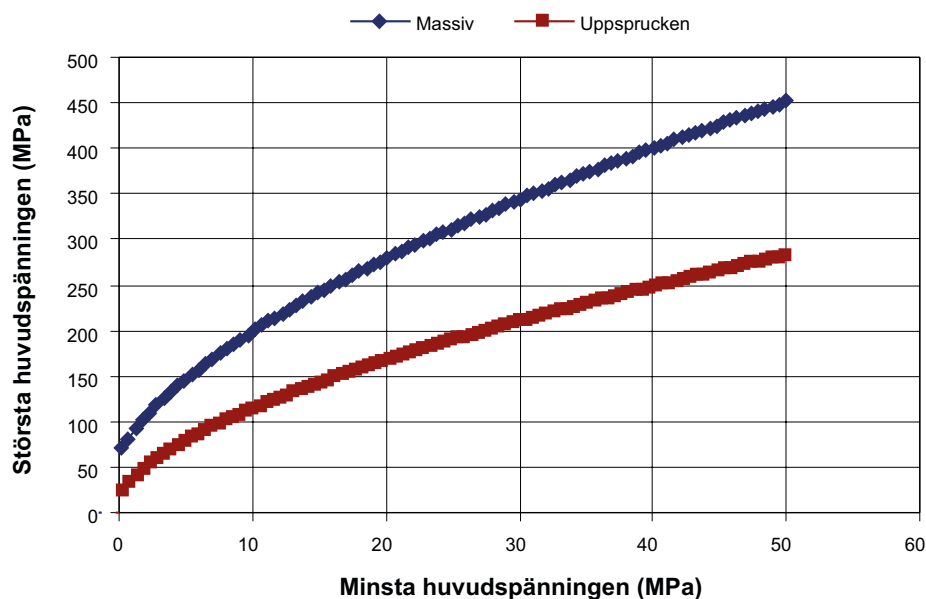
Observationerna i djupa borrhål inom den Baltiska skölden och på andra platser i världen visar entydigt att vi behöver räkna med förekomst av sprickzoner även på stora djup (Juhlin et al. 1998). I flera djupa borrhål verkar det dock finnas en trend att antalet sprickor och sprickzoner reduceras mot djupet. Juhlin et al. (1998) redovisar fyra borrhål som utförts i kristallin berggrund där man noterar en kraftig minskning vid djup större än 1 000–1 500 m. Det finns dock borrhål som avviker från detta mönster (bl. a. Kola-projektet och SKB:s borrhål KLX02A) och som ger stöd för att förekomsten av sprickzoner inte är djupberoende utan i första hand beroende av litologin (Juhlin och Sandstedt 1989, Ekman 2001).

En uppskattning av bergmassans mekaniska egenskaper för de två olika typberggrunderna med hjälp av programvaran RocLab (Rocscience 2002) redovisas i tabell 4-2. Utvärderade mekaniska data redovisas i figur 4-3. Den statistiska vattenpelaren i borrhålet utgör minsta huvudspänning. Normalspänningen mot skjuvhållfasthet för typberggrunderna redovisas i figur 4-4.

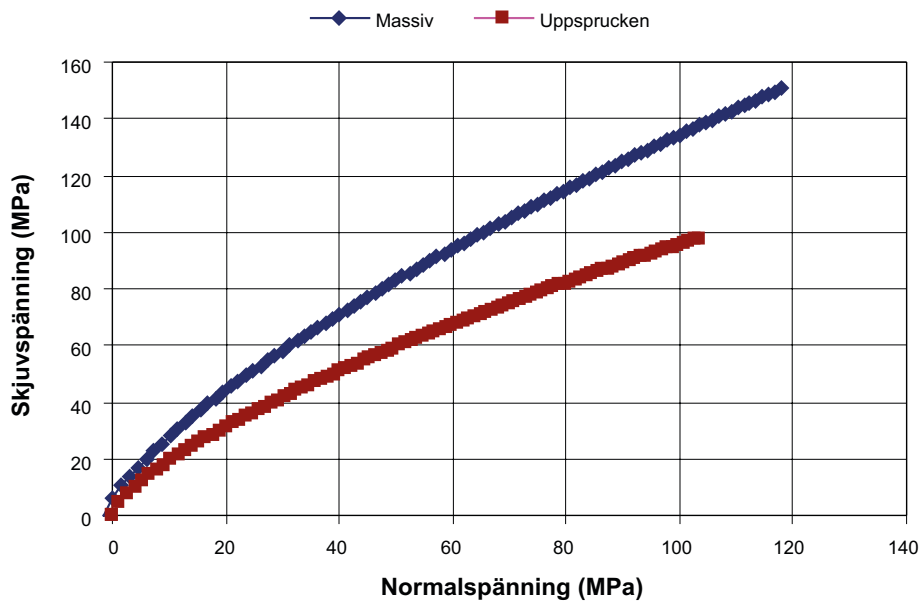
Tabell 4-2. Utvärderade mekaniska egenskaper för de två olika berggrundstyperna med hjälp av programvaran RocLab (Rocscience 2002).

Parameter	Enhet	Massiv bergmassa	Uppsprucken bergmassa
Bergmassans deformationsmodul, E_m	GPa	61.2	9.3
Bergmassans tvärkontraktionstal, ν_m		0.25	0.25
Bergmassans enaxiella tryckhållfasthet, σ_{cm}	MPa	115.5	61.4
Kohesion, c	MPa	21.4	14.1
Friktionsvinkel, ϕ	Grader	49.3	40.6

Enaxiell tryckhållfasthet för intakt berg, $\sigma_c = 200$ MPa.
Materialkonstant för intakt berg som ingår i Hoek-Browns brottvillkor, $m_i = 32$.



Figur 4-3. Utvärderad brottenvelop för de två olika berggrundstyperna med programvaran RocLab (Rocscience 2002). Den statistiska vattenpelaren i borrhålet utgör minsta huvudspänningen.



Figur 4-4. Uppskattad normalspänning mot skjuvspänning för de två olika berggrundstyperna med programvaran RocLab (Rocscience 2002).

4.3 Bergmekanisk analys

I nedanstående avsnitt analyseras följande tre bergmekaniska aspekter:

- Utfall i borrhålsväggen.
- Borrhålsdeformationer.
- Krypdeformation.

Dessa aspekter är av vikt vid lagringskonceptets samtliga faser men inverkan vid borrhningen förväntas vara större än vid deponering och eventuellt återtag av kapslarna. Analysen är utförd med utgångspunkt från det spänningstillstånd och de mekaniska egenskaper som redovisas under avsnitt 4.1 respektive 4.2. Borrhålet har i analysen antagits ha en diameter på 445 mm med invändig statisk vätskepelare.

4.3.1 Utfall ur borrhålsväggen

Erfarenheten från flera djupa borrhål påvisar problem med utfall ur borrhålsväggen (breakouts) på djup som överstiger 1 000 m (Juhlin et al. 1998). I borrhålet Gravberg-1 uppkom svåra problem med utfall ur borrhålsväggen vid djup större än 1 500 m (Juhlin och Sandstedt 1989). I det tyska kontinentala djupborrningsprogrammet KTB-projektet uppstod problem med utfall redan kring 500 m djup (Sperber 1994). Kalipermätningar längs borrhålet redovisar generella utfall i storleksordningen 0,1–0,2 m för djup ned till 5 km. De största utfallen uppmättes på 7 km djup där de uppgår till ca 0,5 m för en nominell borrhålsdiameter på ca 0,3 m. Utfall i denna storleksordning medför naturligtvis allvarliga störningar på borrhningen genom att de kan orsaka fastborrning, borrhålsavvikelse, svårigheter att ”fiska” och installera foderrör i borrhålet.

Massiv sprickfattig bergmassa

Brottsprocessen i en massiv sprickfattig bergmassa styrs i princip av det tredimensionella spänningfältet. Beroende av detta kan man tala om tre brottmekanismer, nämligen dragbrott, spjälkbrott och skjuvbrott. Dragbrott uppkommer vid närvaro av dragspänningar i någon riktning, spjälkbrott vid tryckbelastning med små sidotryck och skjuvbrott vid treaxlig belastning (högt sidotryck). För det spänningstillstånd som redovisas under avsnitt 4.1 förväntas inget dragbrott uppkomma utan den brottmekaniska som antas dominera i avsnitt med massiv sprickfattig bergmassa är spjälkbrottet eftersom vätsketrycket (sidotrycket) är betydligt lägre än randspänningen. En kombination av spjälkbrott och skjuvbrott kan dock tänkas uppkomma på djup större än 4 km.

Spjälkbrott initieras normalt genom uppsprickning i den region av borrhålsväggen där tangentialspänningen är som störst. I ett anisotropt spänningsfält uppkommer spjälkningen således vinkelrät mot största horisontella huvudspänningen.

Den primära brottorsaken är tillväxt av mikrosprickor. Laboratorieförsök och in situ experiment har visat att brottet initieras i borrhålsväggen när tangentialspänningen motsvarar ungefär halva tryckhållfastheten (Martin 2005). Formen och djupet på utfallet ur borrhålsväggen som spjälkningen orsakar är beroende av bergmassans hållfasthet och spänningsnivå.

Genom att spjälkningen av borrhålsväggen orsakar en omfördelning av spänningarna i den omgivande bergmassan så kommer en stabil borrhålssektion att uppkomma på nytt. Det är också möjligt att reducera spjälkningen genom att använda tyngre borrhåtska. Det har dock visat sig svårt att undvika spjälkbrott i djupa borrhål (Juhlin och Sandstedt 1989).

För det uppskattade spänningstillståndet och de egenskaper vi antagit för massivt sprickfattigt berg (se avsnitt 4.1 respektive 4.2) bedöms att spjälkbrott kan uppkomma på ca 1,5 km djup. Baserat på ett empiriskt samband som redovisas av Martin (2005) har djupet på utfallet som spjälkbrottet skapar uppskattats till ca 15 mm på 1,5 km djup (3 % av borrhålsdiametern) och till ca 85 mm på 5 km djup (19 % av borrhålsdiametern). Vid en reduktion av borrhålets inre vätsketryck kommer spjälkbrott att uppkomma på ett grundare borrhålsdjup samtidigt som utfallen blir större. En halvering av borrhålets inre vätsketryck i samband med borring bedöms grovt sett medföra en dubblering av utfallen på stora borrhålsdjup.

Utfall ur borrhålsväggen på grund av spjälkning bedöms i första hand vara ett problem under själva borringen av borrhålet. När borrhålet är infodrat är borrhålet normalt stabilt med avseende på denna typ av stabilitetsproblem. *In-situ*-experiment visar nämligen att förstärkningstrycket inte behöver vara särskilt stort för att processen ska upphöra (Andersson 2007). Det är dock möjligt att spjälkning kan uppkomma på nytt vid deponering av kapslar på grund av att temperaturen höjs i det omgivande berget. Spjälkningen skulle i detta fall kunna skapa en vertikal flödesväg (Juhlin et al. 1989).

Kraftigt uppsprucken bergmassa

I avsnitt där borrhålet passerar en kraftigt uppsprucken bergmassa kan man i princip tänka sig två olika typer av brottmekanismer där den ena mekanismen är strukturkontrollerad medan den andra är spänningskontrollerad. I båda fallen är det dock frågan om skjuvbrott längs existerande svaghetsplan i bergmassan.

Det strukturkontrollerade brottet beror i huvudsak på sprickgeometrin och sprickornas egenskaper. Stabilitetsproblem uppkommer längs svaghetsplan i bergmassan genom att kilar och block faller ut på grund av gravitationen. Stabilitetsproblemen kan fortplantas till intill liggande block som också kommer i rörelse. Närvaron av vatten och lermineral i bergsprickorna kan öka risken för utglidning. Denna typ av brott kan ge upphov till utfall på alla djup längs borrhålet och skapa problem så länge detta är ofodrat.

När det gäller det spänningskontrollerade brottet i en kraftigt uppsprucken bergmassa så uppkommer detta när spänningstillståndet i bergmassan ger upphov till skjuvspänningar som överskrider bergmassans samverkande skjuvhållfasthet. Denna typ av brott kan beskrivas med Hoek-Browns brottvillkor om flera sprickgrupper förekommer och bergmassans egenskaper är liknande i olika riktningar (Hoek et al. 1994). Under antagande att Hoek-Browns brottvillkor är tillämpligt har – för det uppskattade spänningstillståndet och för de egenskaper vi antagit för kraftigt uppsprucken bergmassa (se avsnitt 4.1 respektive 4.2) – spänningskontrollerat skjuvbrott bedömts kunna uppkomma på djup större än 1 km. Dessa stabilitetsproblem bedöms i först hand kunna skapa bekymmer i samband med borringen, men innan man har gjort en fördjupad utredning bör man inte utesluta att skjuvbrott även kan orsaka problem i senare skeden. Det rekommenderas således att man utreder risken för att skjuvbrott kan orsaka skador på borrhålets infodring.

4.3.2 Borrhålsdeformationer

Borrhålsdeformationer som kan förväntas uppkomma kring ett djupt borrhål har uppskattats med hjälp av ”Ground Reaction Curve” (Hoek et al. 1994). Analysen är baserad på ett borrhål i en bergmassa med elastoplastiskt uppförande. Borrhålet har i analysen antagits vara ofodrat med diametern 445 mm och med invändig statisk vätskepelare. Spänningstillstånd och mekaniska egenskaper har antagits i enlighet med avsnitt 4.1 respektive 4.2.

Massiv sprickfattig bergmassa

I massiv sprickfattig bergmassa av god kvalitet bedöms de borrhålsdeformationer som uppkommer i huvudsak vara elastiska. Den radiella deformationen som uppkommer i borrhålet ner till 5 km djup bedöms inte överstiga ca 1 mm vid en deformationsmodul på kring 60 GPa. Fastän de inducerade spänningarna kring ett djupt borrhål förväntas vara mycket höga (250–500 MPa på 5 km djup) kommer alltså borrhålsdeformationen i avsnitt med massiv sprickfattig bergmassa att vara mycket begränsad. Deformationen i dessa avsnitt bedöms således inte inverka vare sig på borringen eller på någon senare fas inom lagringskonceptet.

Kraftigt uppsprucken bergmassa

I kraftigt uppsprucken bergmassa av dålig kvalitet förväntas borrhålsdeformationer omfatta både elastiska och plastiska deformationer. Den inre vätskepelaren i borrhålet kommer dock att medföra att de plastiska deformationerna blir relativt begränsade även i avsnitt med kraftigt uppsprucken bergmassa. Den radiella deformationen som uppkommer i borrhålet på 5 km djup förväntas uppgå till ca 3 mm (ca 1 % av radien) vid en deformationsmodul på ca 10 GPa. En halvering av borrhålets inre vätsketryck bedöms medföra ungefär 30 % ökning av borrhålets radiella deformation.

I avsnitt med kraftigt uppsprucken bergmassa av dålig kvalitet är det alltså tänkbart att det uppkommer problem vid borringen som ett resultat av borrhålsdeformationerna. För de beräknade deformationerna kan man tänka sig att borrhålssträngen skulle kunna fastna vid upptag. Problem under borringen som antas kunna bero på reducerad borrhålsdimension finns bland annat dokumenterade från KTB-projektet (Sperber 1994).

4.3.3 Krypdeformationer

Krypdeformation definieras vanligen som tidsberoende deformationer i bergmassan för en last som är lägre än bergmassans momentana hållfasthet. Kryprörelse återgår normalt inte när lasten tas bort. Krypdeformationer är således till sin natur i huvudsak plastiska.

Krypdeformationer kring ett djupt borrhål för deponering av använt kärnbränsle kan göra sig gällande genom krypning i det intakta berget och krypning längs sprickplan. I massiva sprickfattiga bergmassor är krypningen i intakt berg av betydelse medan krypningen i kraftigt uppspruckna bergmassor kommer att domineras av krypning längs sprickplanen. Orsaken till detta förhållande är att skjuvhållfastheten vanligen är lägre för sprickplan än för intakt berg, speciellt för sådana sprickor som är belagda eller fyllda med sprickmineral.

Krypdeformationer uppdelas vanligen i tre olika faser, transient krypning, stationär krypning samt accelererande krypning som uppkommer strax innan provet går i brott. Beroende av de mekaniska egenskaperna och belastningen kan något av de tre stadierna dominera krypprocessen. Lasten måste dock uppgå till viss del av bergprovets momentana hållfasthet för att kryprörelser överhuvudtaget ska uppkomma. Krypdeformationen kring ett djupt borrhål kommer att reducera anisotropin i spänningstillståndet så att bergvolymen som uppnått den stationära krypfasen kommer att återgå till den transienta fasan efter viss kryprörelse.

Massiv sprickfattig bergmassa

I en massiv sprickfattig bergmassa, där krypdeformationer i det intakta berget antas dominera, uppkommer krypdeformationer vanligen genom två tidsberoende processer: förskjutningar längs defekter i kristallstrukturen samt stabil varaktig mikrosprickbildning. Vilken av de två processerna som har störst inverkan på den makroskopiska responsen beror bland annat på faktorer som bergmassans spänningsnivå relativt dess tryckhållfasthet, samt bergmassans temperatur relativt dess smältpunkt (Landanyi 1993).

Här antar vi att det är stabil varaktig mikrosprickbildning som dominerar. Bergmassans uppskattade temperatur efter deponering av använt kärnbränsle bedöms dock på djup större än 4 km uppgå till de temperaturer som normalt antas utgöra gränsen för sprött uppförande, 100–150 °C (Pusch och Hökmark 1993).

Laboratorieförsök på intakt berg i granit visar att det finns en tröskelnivå kring 40 % av tryckhållfastheten där ingen krypning uppkommer och en annan tröskelnivå kring 80 % av tryckhållfastheten som måste överstigas för att krypningen ska bli stationär och inte upphöra direkt (Martin 1997).

För det uppskattade spänningstillståndet och de egenskaper vi antagit för massivt sprickfattigt berg (se avsnitt 4.1 respektive 4.2) bedöms att spänningsnivån kring ett borrhål med statisk vätskepelare kan överstiga tröskelnivån där vi kan förvänta oss stationär krypning vid ca 3 km djup. Någon uppskattning av hur stora krypdeformationerna blir har inte gjorts utan slutsatsen är tillsvidare av kvalitativ natur.

Kraftigt uppsprucken bergmassa

I en kraftigt uppsprucken bergmassa kan man approximativt anta att krypdeformationen uteslutande uppkommer längs sprickplan och sprickzoner. Den drivande kraften bakom krypdeformationen är i detta fall förekomsten av ett anisotropt spänningstillstånd. Teoretiskt sett kan krypdeformationen fortgå tills dess att spänningstillståndet övergått till ett isotropt tillstånd eller tills dess att skillnaden i spänningarnas magnitud reducerats under en viss tröskelnivå (Glamheden och Hökmark 2010).

Laboratorieförsök på bergprover i kristallint berg visar att det finns tröskelnivåer som är relaterade till skjuvspänningens magnitud (Amadei och Curran 1982, Bowden och Curran 1984, Schwartz och Kolluru 1982). Baserat på dessa försök kan man göra en grov uppskattning av att skjuvspänningen måste överstiga ca 30 % av skjuvhållfastheten för en ofylld spricka och ungefär 10 % för en fylldspricka för att krypning ska uppkomma (Glamheden och Hökmark 2010). Vidare kan man uppskatta att skjuvspänningen måste överstiga ca 70 % av skjuvhållfastheten för en ofylldspricka och ca 50 % för en fylldspricka för att krypningen ska vara stationär (Bowden och Curran 1984, Malan et al. 1998).

För det uppskattade spänningstillståndet och de egenskaper vi antagit för kraftigt uppsprucket berg (se avsnitt 4.1 respektive 4.2) bedöms att spänningsnivån kring ett borrhål med statisk vätskepelare kan överstiga tröskelnivån där vi kan förvänta oss stationär krypning i fyllda sprickplan på djup som överstiger 1,5 km. Om krypning uppkommer i ofyllda sprickplan bedöms den i huvudsak vara transient. Någon uppskattning av hur stora krypdeformationerna blir har inte gjorts, utan slutsatsen är tillsvidare av kvalitativ natur.

4.4 Slutsatser

Bergmekaniska effekter bedöms i första hand kunna skapa bekymmer i samband med borringen av borrhålet genom att utfall och stora deformationer kan orsaka fastborring och borrhålsavvikelse, samt svårigheter att infodra borrhålet.

I avsnitt med en massiv sprickfattig bergmassa och statisk vattenpelare i borrhålet bedöms spjälkbrott kunna ge utfall i borrhålet på djup större än 1,5 km. Vid en reducering av borrhålets inre vätsketryck, och i ännu större utsträckning vid underbalanserad borring med luft, kommer spjälkbrott att uppkomma på ett grundare borrhålsdjup, samtidigt som utfallen blir större.

I avsnitt med en kraftigt uppsprucken bergmassa kan strukturkontrollerade utfall uppkomma på alla djup längs borrhålet så länge det är ofodrat, och spänningskontrollerade skjuvbrott bedöms kunna uppkomma på djup större än 1 km. I kraftigt uppsprucken bergmassa kan man dessutom förvänta sig problem vid borringen på grund av deformationer.

Innan man har gjort en fördjupad utredning kan man inte utesluta att bergmekaniska effekter kan komma att skapa problem även vid deponering och eventuellt återtag av kapslar. I detta fall är det i borrhålsavsnitt med kraftigt uppsprucken bergmassa som skjuvbrott och krypdeformationer kan tänkas komma att skada och deformera infodringen.

Ovanstående diskussion om bergmekaniska effekter är i första hand baserad på att 5 kilometer djupa hål med slutdiameter 445 mm borrar. Om istället grundare hål med större diameter borrar (4 km, 800 mm diameter) innebär detta att omgivande bergspänningarna kommer att bli lägre, men risken för strukturkontrollerade utfall kommer att vara större på grund av den större diametern. Hålets deformation vid borringen kommer dessutom att öka vid större diameter. Sammantaget bedöms det, ur bergmekanisk synpunkt, vara enklare att borra och deponera i 5 km djupa borrhål med slutdiameter 445 mm än i 4 km djupa hål med slutdiameter 800 mm.

De temperaturer som förväntas råda på 3 000–5 000 meters djup i berggrunden bedöms inte medföra borrhåls tekniska svårigheter.

5 Borrning

5.1 Kritiska parametrar

De parametrar som har avgörande betydelse för ett framgångsrikt borrprojekt är borrhålsstabilitet, mekanisk påverkan pga borrning, rakhet och vertikalitet, samt temperatur. Dessa kommenteras nedan. Dessutom är det väsentligt med noga ”påhugg” och inmätning av påhugg i berg, planering av hela borrhålsprojektet såväl som omsorgsfull planering av varje enskilt borrhål där organisation och god (stor) erfarenhet av liknande borrningar hos borrhålsledningen är ett måste, ”back up” med verktygslåda för fiskning och rensning i borrhål och allehanda borrhålshaverier, val av bormaskin och kringutrustning.

5.1.1 Borrhålsstabilitet

Med ett instabilt borrhål riskerar man att bergbitar faller in i borrhålet, se figur 5-1, vilket kan leda till att borren fastnar. Då kan den i bästa fall dras loss, men om inte det är möjligt avskiljs borrhålsövanför den punkt där man fastnat. Därefter kan man antingen fortsätta borra upp ett nytt borrhål strax utanför befintligt borrhål, så kallad side track vilket sannolikt gör hålet olämpligt för deponering, eller så får borrhålet lämnas.

Det finns också en viss risk att borrhålet krymper efter att borrhålskronan passerat, vilket kan leda till stora problem under hela borroperationen eftersom borrhålet hela tiden måste rensas för att hållas öppet till erforderlig diameter.

Att borra rakt är nödvändigt och kan uppnås antingen genom aktiv styrning eller genom att använda styv borrhålssträng i botten. Om borrhålet har blivit för stort eller asymmetriskt kan det vara svårt att upprätthålla borrhålets rakhet. Naturligtvis är det även andra faktorer som spelar in, inte minst geologiska och bergmekaniska parametrar.

5.1.2 Mekanisk påverkan på grund av borrning

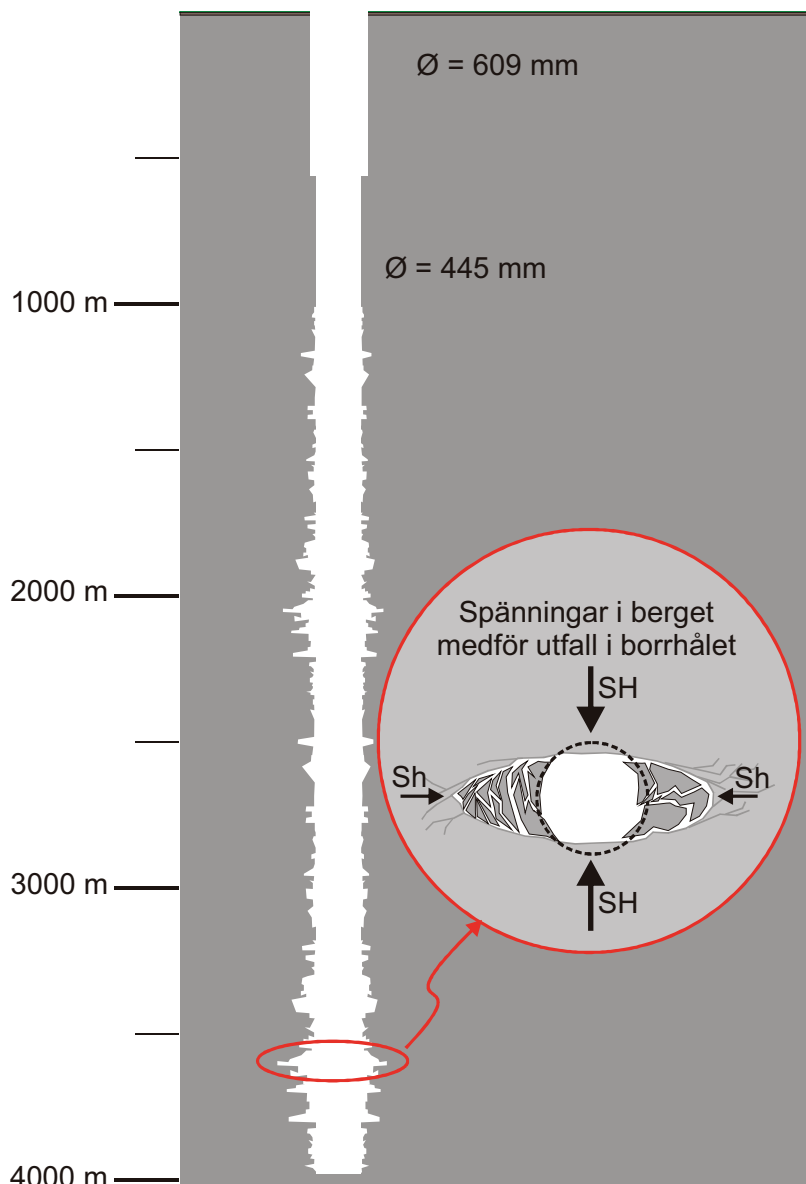
Själva borrhålsoperationen kommer förmodligen att pågå mer än 100 dagar per hål, vilket innebär en längre tids påverkan på borrhålsväggen från borrhålskronor och borrhålssträngar. Det är under borrhålsoperationen, samt när man går ner i eller ut ur borrhålet för till exempel byte av borrhålskronor, som slitage från rotation, skrapande rör, borrhålskronor samt vibrationer kommer att påverka borrhålet och dess geometri.

5.1.3 Rakhet och vertikalitet

Hålets rakhet har betydelse för att kunna installera foderrör och deponera kapslar. Vertikalitet är i första hand viktigt för att undvika förhöjt slitage på borrhålsutrustningen. Viss loggutrustning kan även vara svår att få ned i borrhålet om hålet avviker för mycket från vertikallinjen. Sammantaget innebär detta att grenade hål bör undvikas. Dessutom kan inte ”grenen” kläs med foderrör.

5.1.4 Temperatur

På stora djup, där det är höga temperaturer, kan man få bergmekaniska stabilitetsproblem som orsakas av temperaturväxlingar vid till exempel kraftig cirkulation av borrhålsvätska eller när man går ur/i borrhålet med borrhålssträngen. Spänningsförändringar kan då uppstå som orsakar att berget spjälkas av. Så skedde i det djupa KTB hålet där temperaturen i botten var över 250 grader C. Vid höga temperaturer finns begränsningar i vilken utrustning som kan användas. Elektroniken i loggningsutrustning och styrutrustning liksom hållfastheten i borrhålssträngen påverkas negativt.



Figur 5-1. Principiell bild visande geometrisk förändring av borrhål på grund av bergspänningar. Normalt ökar problemen med djupet. SH = Största horisontella huvudspänningen. Sh = Minsta horisontella huvudspänning.

5.2 Referensprojekt

Projektbeskrivning och resultat från väsentliga referensprojekt redovisas i kronologisk ordning nedan.

5.2.1 Kola, världens djupaste borrhål 12 261 m

NEDRA

Det ryska borrhäret Nedra har lång och omfattande erfarenhet av vetenskapliga undersökningsborrningar till stora djup. Man har bland annat utfört världens djupaste borrhål (12 261 m) på Kolahalvön och ett (2 516 m) djupt borrhål i Finland men har också arbetat med ett ryskt koncept för deponering av radioaktivt material i djupa borrhål.

I Juhlin och Sandstedt (1989) redovisas sju vetenskapliga borrningar som sannolikt alla är utförda av Nedra, varav fyra är till 4 000 m eller djupare.

Enligt dokumentation som delgivits författarna har Nedra också erfarenhet av borrhning till maximalt 4 km i större dimensioner (640–394 mm) i kristallint berg. Man har då en speciell borrhsteknik som är utvecklad för kristallint berg, Rotary Turbine Drilling (RTB).

Syfte

Syftet med borrhålet på Kolahalvön var forskning om hur jordskorpan bildats och hur man skall tolka seismiska reflektorer, och att förstå djupstrukturen på den kontinentala jordskorpan och de krafter som har format den under cirka 4 miljarder år. Borrhningen startade redan 1970 och pågick med avbrott till 1984. Borrhålet är beläget 250 km norr om polcirkeln i närheten av Murmansk, Baltiska skölden.

De geologiska formationerna varierar allteftersom man tränger igenom de olika lagren i jordskorpan. Granit och granodiorit är de dominerande bergarterna men också sektioner med metamorfa bergarter som var upp till cirka 2,8 miljarder år gamla, när man kommer ned i Arkeikum, jordskorpanns äldsta lager.

Borrhningsteknologi

Hålet började borraras med konventionell rotationsborrhning, med borrhsträng av stålrör och tyngdborrhör (drillcollars) och övergick på djupet till turbinborrhning med en lättare borrhsträng av höghållfasta aluminiumborrhör. I båda fallen borrhades kontinuerligt med kärnborrhkronor och kärnprovtagare.

Genom de ytliga jordlagren borrhades till 40 m med 1 m diameter, som infodrades med 720 mm foderrör. Därefter borrhades hela borrhålet med borrhkrona med diametern 214 mm. Den övre sektionen till 2 000 m rymdes därefter och 325 mm foderrör installerades. Under 2 000 m var det och är alltfjämt öppet borrhål, och detta stabiliseras i stället med borrhväska.

Borrhningen var konventionell, d v s hela borrhsträngen togs upp för att tömma kärnprovtagaren eller för att byta borrhkrona. Turbinen drevs av borrhväska och var nedväxlad så att varvtalet på borrhkronan var 80–150 rpm. Både borrhkronor och kärnprovtagare utvecklades successivt under projektets gång. Vid större djup var problemet att kärnan skivades upp i diskar när bergspänningarna släppte, och diskarna blockerade kärnröret. Mot slutet användes rullborrhkronor med 60 eller 80 mm kärna och 6 eller 8 rullar, och en kärnprovtagare som samlade upp ”diskarna” som bildades i en behållare.

Borrhningen var 86 m hög med en lyftkapacitet på 400 ton. Den var inbyggd så att borrhningen kunde ske frostfritt året om.

Erfarenheter

Hålet avvek från lodlinjen med i genomsnitt 5 grader från vertikalen och som mest med 17 grader på 10 500 m djup. Därefter rätades borrhålet upp igen. Sensorer med gyroskop användes för att mäta borrhålets lutning och styra borrhkronan.

Kraftiga utfall (breakouts) och mycket stora variationer av borrhålets geometri uppstod. Breakouts uppträdde redan på 1 800 m djup och var kraftigast på 7 000 m djup. Det saknas uppgifter på hur stora problem dessa orsakade under själva borrhningen.

Förutom problemen med borrhålsstabilitet och breakouts nämner man problem med temperaturen (230 °C på 12 000 m djup) som minskar hållfastheten hos aluminiumborrhören och värmer upp borrhväska.

Svårigheten att friborra och ta upp kärna var stor eftersom den brister i diskar när den friborras.

5.2.2 Siljansborrhningen

Djupgasprojektet

I början på 1980-talet fick Vattenfall kontakt med professor Thomas Gold, som hade introducerat teorin om att stora mängder naturgas hade fångats i jordens inre under dess bildande. Enligt denna teori har gasen allt sedan dess läckt ut till markytan eller fångats i någon lämplig reservoar. Om teorin stämmer, skulle det finnas förutsättningar att påträffa gas även i kristallint urberg – om det finns geologiska förutsättningar för en reservoar.

Vattenfall beslöt att undersöka teorin vidare. Under 1982 genomfördes en förstudie, som bland annat belyste djupgasteorin och möjliga platser i Sverige med reservoarförutsättningar inventerades, dels områden med poröst och sprucket berg. Studien koncentrerades till ett antal meteoritimpakter samt till Vätternsänkan.

Intresset fokuserades tidigt till Siljansringen, en meteoritimpakt som bildades för ca 360 miljoner år sedan. Ett omfattande undersökningsprogram genomfördes, innefattande bland annat geofysiska undersökningar, geokemisk provtagning och borrning av kärnborrhål. Undersökningarna visade att porositeten i berggrunden var avsevärt högre än vad som är normalt förekommande i svenskt urberg; en porositet på upp till 3 % uppmättes på granitiska borrkärnor. Utförda reflektionsseismiska undersökning påvisade dessutom förekomsten av markanta horisontella strukturer på ca 1,5, 3,5 och 9 km djup.

Efter flera års undersökningar beslöt Vattenfall 1985 att borra ett djupt borrhål i Siljansringen. Vattenfalls ägare, den svenska staten, begärde att en stor del av borrningen skulle finansieras av externa intressenter, bland annat för att visa att projektet var kommersiellt. Vattenfall bildade sålunda Dala Djupgas HB, som på kort tid mobiliserade 150 M SEK för borrningen av Gravberg-1. Ett substantiellt bidrag till borrningen, 30 M SEK, erhöles från ett amerikanskt forskningsinstitut, Gas Research Institute i Chicago.

Borrningen påbörjades i juni 1986. Pengarna var förbrukade sommaren 1987 men borrningen kunde återupptas sommaren 1988 efter en framgångsrik nyemission. Borrningen avslutades september 1989 vid en borrarad längd på 6 957 m och efter omfattande tester i borrhålet men utan kommersiella fynd av gas. Den vetenskapliga nyttan torde emellertid vara betydande och borrhålet utgör fortfarande Sveriges viktigaste kunskapskälla om geologiska förhållande på stora djup.

Djupgasprojektet var omdiskuterat av i första hand geologer, som ifrågasatte möjligheterna att påträffa gas i svenskt urberg. Denna redovisning fokuserar på borrningen av borrhålet Gravberg-1 och därav vunna tekniska erfarenheter. Det omfattande vetenskapliga arbetet, som utfördes i anslutning till borrningen belyses endast översiktligt.

Förundersökningar

Undersökningar

Som underlag för sitt beslut om djupborrningsprojektet genomförde Vattenfall under 1983 och 1984 omfattande studier och undersökningar. Dessa innefattade bland annat:

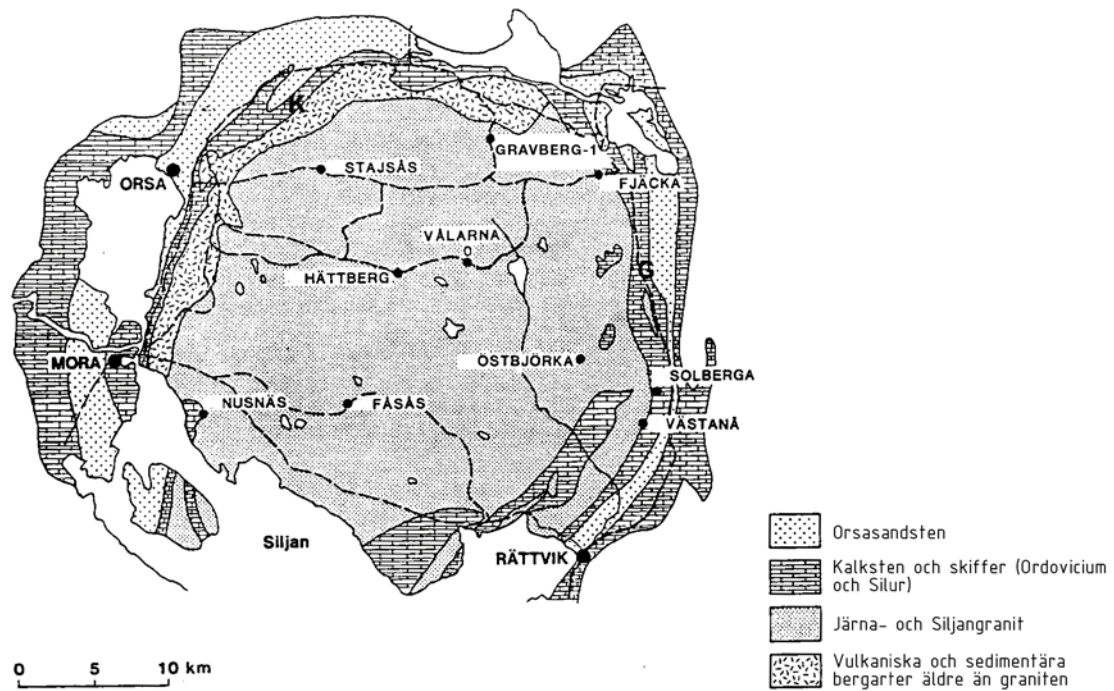
- Teoretiska analyser av meteoritimpakten baserad på bedömda energimängder och dagens geologiska struktur av Siljansringen.
- Kärnborrning av 7 borrhål, varav det djupaste var ca 700 m.
- Geokemiska analyser.
- Reflektionsseismisk undersökning, två korsande linjer.
- Gravimetrisk undersökning.
- Elektrisk undersökning (magnetotellurisk mätning).

Resultatet av undersökningarna finns bland annat redovisade i Juhlin (1991).

En översiktlig geologisk beskrivning av Siljansringen framgår av figur 5-2. På kartan framgår även läget för borrarade kärnborrhål och läget för borrhålet Gravberg-1.

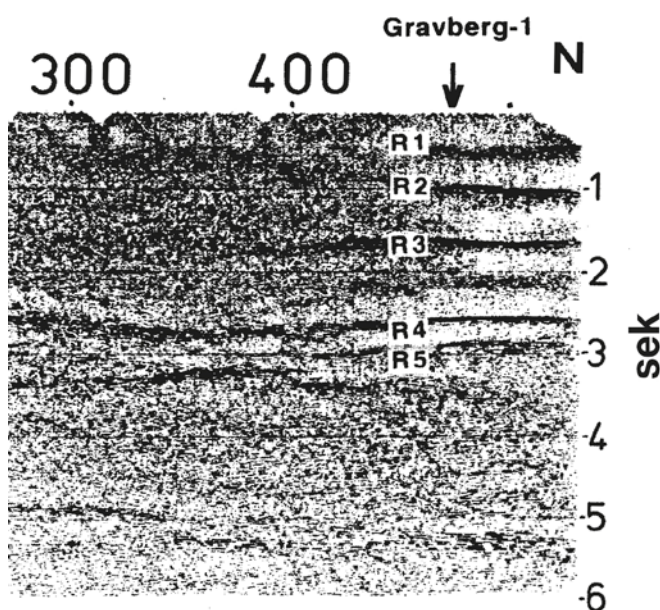
Lokaliseringen av borrhål

Baserat på de utförda undersökningarna diskuterades två lämpliga lägen på borrhålet; centralt eller längre ut från centrum i den nord-östra delen av strukturen. En placering av borrhålet i den centrala delen av Siljansringen (nära byn Stenberg) förordades. Efter diskussioner togs dock beslutet att borra ett första borrhål nära byn Gravberg i den nord-östra delen av Siljansringen.



Figur 5-2. Översiktlig geologisk karta över Siljansringen. (Juhlin 1991).

Beslutet att borra i Gravberg baserades på resultatet av de seismiska och gravimetriska undersökningarna. Den seismiska undersökningen påvisade tydliga reflektorer, som slutade ca 10 km från centrum av impakten. De horisontella strukturerna tolkades som möjliga lockstrukturer för inestängning av naturgas. Tolkningen antydde också en lägre seismisk hastighet mellan reflektor R3 (ca 5 km djup) och R4, indikerande högre porositet. Även den gravimetriska undersökningen tydde på poröst berg i området. Resultatet av den seismiska undersökningen framgår av figur 5-3, som även visar läget för borrhålet Gravberg-1.



Figur 5-3. Seismisk undersökning i Siljansringen. Reflektor R1 bedömdes ligga på ca 1,5 km, reflektor R2 på ca 3 km och reflektor R3 på ca 5 km djup. (Juhlin 1991).

Borrning av Gravberg-1

Inledning

Den presentation av djupgasborrningen som redovisas i föreliggande rapport är baserad på Vattenfalls vetenskapliga redovisning av Djupgasprojektet (Juhlin 1991) och Håkan Sandstedts personliga erfarenheter från borrningen.

Organisation

Borrningen av Gravberg-1 genomfördes av Vattenfall på uppdrag av Dala Djupgas HB. Utöver personal från Vattenfall anlätades experter från England och USA. De ledande personerna, John Beswick och Perry Moore, hade båda medverkat vid geotermisk borrning i Cornwall, UK, där två borrhål hade borrats i granit, ett till 2 km och ett till 3 km djup.

För att säkerställa de vetenskapliga aspekterna på borrningen bidrog amerikanska Gas Research Institute med expertis under såväl planeringsskedet som själva borrningen. Under delar av borrningen hade Gas Research Institute en vetenskaplig controller på plats i Gravberg.

Borrningen genomfördes med hjälp av inhyrd personal från USA. Erforderliga servicetjänster handlades upp i konkurrens från internationella serviceföretag inom oljeindustrin.

Borrprogram

Planeringen av borrningen baserades på erfarenheter från oljeindustrin och från geotermisk borrning i Cornwall (Camborn School of Mines). Inom oljeindustrin fanns betydande erfarenhet av borrning kristallina bergarter, bland annat från borrning genom överskjutningar i Klippiga bergen. (Överskjutningar innebär att kristallint urberg har skjuts ut över sedimentära kolväteförande bergarter på större djup).

Själva borrningen samt val av borrhåls- och foderrördimensioner anpassades för ett måldjup på 5 km och förekommande reflektorer på ca 1,5, 3 och 5 km djup.

Föreslaget borrprogram framgår av tabell 5-1. Med detta program bedömdes det möjligt att fortsätta borrningen ner till 7,5 km – förutsatt att finansiella medel skulle finnas tillgängliga. Strategin var att borra med 17,5 tum (445 mm) till 1 250 m, med 12,25 tum (311 mm) genom reflektorn på 1,5 och 3 km djup och med 8,5 tum (216 mm) genom reflektorn på 5 km djup.

Erforderlig tid för att borra ett borrhål ner till 5 000 m inklusive planerade undersökningar bedömdes till 131 dagar vid hydrostatiskt grundvattentryck.

Tabell 5-1. Borrprogram.

Djup, m	Borrkrona, Ø tum/mm	Foderrör Ø tum/mm
0 –1 250	17,5 / 445	13,375 / 340 *)
1 250–3 000	12,25 / 311	9,625 / 244 *)
3 000–5 000	8,5 / 216	7,75 / 197 **)

* Foderrör som installeras från borrhålsbotten och till markytan.

** Foderrör som installeras mellan borrhålsbotten och ovanliggande foderrör.

Borrrigg

Borrning inom oljeindustrin utförs normalt av något borrhålsföretag, som tillhandahåller borrhålsrigg och personal. Borrprojektet upphandlas baserat på kompetens och pris och ersätts normalt per dygn. Borrningen genomförs under ledning av beställaren.

Genom recessionen inom oljeindustrin i mitten på 1980-talet fick Dala Djupgas möjlighet att köpa en begagnad borrhålsrigg till ett attraktivt pris. Beslutet att köpa en egen borrhålsrigg visade sig vara ekonomiskt fördelaktigt och möjliggjorde stillestånd i borrningen med omstart efter en nyemission. Borrplats med borrhålsrigg framgår av figur 5-4. Borrplatsen storlek var drygt 200×150 m.

Borrhålsriggen, en dieselelektrisk Mid-Continental U-1220 EB, är konstruerad för borrning till ca 9 km djup. Mindre modifikationer utfördes för att kunna driva riggen med el från kraftnätet.



Figur 5-4. Borrplatsen med borrhigg i Siljansringen, Gravberg-1.

Borrkronor

För borrhningen användes standard rullborrkronor från oljeindustrin, tillverkade av Smith Industries. Borrkronorna var konstruerade för borrhning i hårt, nötande berg. Vid planeringen antogs en genomsnittlig borrsjunkning på 91,4 m per borrkrona.

Prestanda för borrkronorna framgår i tabell 5-2. Angivna siffror avser genomsnittligt utfall för respektive borrdiameter.

Observationer på borrkronorna indikerade normalt förväntat slitage. För 6,5 tums (165 mm) borrkronor som användes under 5 000 m observerades skador på grund av ett kraftigt lutande borrhål.

Tabell 5-2. Prestanda för borrkronor.

Borrhål, diameter tum/mm	Borrkronor st	Typ av borrkrona	Totalt borrade timmar*	Livslängd m/ borrkrona	Livslängd h/ borrkrona	Borrsjunkning m/h
17,50 / 445	10	H100	433	120,5	43,3	2,8
12,25 / 311	35	H100, H100F	960,3	84,4	27,4	3,1
8,50 / 216	43	H100F	1 554,5	76,7	36,2	2,1
6,5 / 165	40**	H99F, H88F	1 033,8	48,1	25,8	1,9

* Med borrade timmar avses den tid när borrkronan roterar på borrhålsbotten.

**Inkluderar ej omborrhning 3.

Kärnborrhning

Kärnborrhning utfördes främst för att kalibrera de geofysiska undersökningarna i borrhålet. Baserat på erhållna kärnprover bestämdes bergart, porositet och hållfasthet.

Kärnborrhningen utfördes med stora svårigheter. För att förbättra kärntagningen provades olika typer av borrkronor, stabiliseringsutrustningar i borrhålet, kärnfångare och kärnrör. Merparten av kärnborrhningen utfördes med rullborrkronor ("six cone hard rock coring bits") men även en diamantkrona provades. Utförd kärnborrhning framgår av nedanstående tabell.

Tabell 5-3. Kärnbörning Gravberg -1.

Djup, m	Kärn-börning, m	Erhållen borrhärna, m	Kommentar
1 001,6–1 009,8	8,2	1,2	1 kärnbörning
1 474,6–3 377,5	72,2	5,3	8 kärnbörningar utfördes mellan 1 474,6–3 377,5 m. Vid 4 tillfällen erhöles ingen kärna.
4 167–6 081	22,9	2,0	3 kärnbörningar utfördes mellan 4 167–4 758 m. Vid två tillfällen gick det inte att komma ner till borrhälsbotten.

På grund av svårigheterna att utföra kärnbörning med acceptabel kärnfångst prövades också kärntagning med hjälp av en utrustning hängande i en kabel, s.k. ”side wall coring instrument”. Instrumentet borrar ut små borrhärnor, ca 2,5 cm i diameter, ur borrhälsväggen. En fördel med ”side wall coring” är att lägena för kärnorna fastställs baserat på utförd geofysisk loggning. Instrumentet fördes ner 5 gånger i borrhålet och totalt erhöles 8 borrhärnor på 40 försök.

Svårigheterna med kärnbörning orsakades av flera samverkande faktorer. Förutom frågeställningar kopplade till kärnbörningsutrustningen försvårades kärntagningen av vibrationer vid börning i ett elliptiskt borrhål och av höga anisotropa bergspänningar.

Borrvätska

Borrvätskan som cirkulerar i borrhålet skall föra upp lossgjort berg, borrhär, till markytan, rengöra borrhålet och reducera friktionen mellan den roterande borrhärstängen och borrhälsväggen. För bästa borrhär-sjunkning var målsättningen att borra med vatten som borrhärsvätska så långt som möjligt. Om problem skulle uppstå med borrhälsfriktion, svårigheter att rengöra borrhålet från borrhär eller för att stabilisera borrhålet var planen att successivt tillsätta polymerer (pulver av cellulosa), bentonit och bariumsulfat.

Börningen utfördes med vatten ner till 3 932 m. För att reducera friktionen i borrhålet tillsattes polymerer eller bentonit i successivt ökande mängder. För att stabilisera borrhålet och begränsa ellipticiteten ökades borrhärsvätskans vikt under 4 000 m genom tillsättning av bariumsulfat. Borrärsvätskans vikt ökades successivt för att vid en vikt motsvarande 1,63 ton per m³ bli så tung att berget spräcktes oavsiktligt och stora mängder borrhärsvätska förlorades till berget. För att reducera friktionen i borrhålet och för att reducera risken för fastsättning utfördes ombörning 2 och 3 med en borrhärsvätska baserad på dieselolja.

I tabell 5-4 redovisas översiktligt använd borrhärsvätska i Gravberg-1.

Tabell 5-4. Borrärsvätska i Gravberg-1.

Djup, m	Borrhärsvätska	Kommentar
0–3 932 m	Vatten utan tillsatser	
3 932–4 167	Vatten och polymerer	
4 167–6 081	Vatten och bentonit	
4 636–5 799	Vatten och bentonit	Ombörning 1
5 799–5 938	Vatten utan tillsatser	Ombörning 1
5 938–6 636	Vatten och polymerer	Ombörning 1
5 991–6 600	Dieselolja med tillsatser	Ombörning 2
5 839–6 957	Dieselolja med tillsatser	Ombörning 3

Geologiska undersökningar i borrhålet

”Measurement while drilling”

Under börningen registrerades en mängd parametrar som förutom information om börningen även gav geologisk information, t.ex. indikationer på förekomsten av permeabla sprickor och sprucket berg.

Kartering av borrhax

Borrhax insamlades kontinuerligt för analys av jord och bergarter och indikationer på sprickigt berg. För att undersöka förekomsten av sprickzoner analyserades särskilt förekomsten av sprickmineral.

Gasprovtagning

Analys av gas utfördes kontinuerligt på avgasad borrhväska samt på prover tagna från trycksatt borrhväska.

Borrhålsloggning

I Gravberg-1 genomfördes omfattande mätningar med de borrhålsloggar som normalt används av oljeindustrin vid borrhning av undersökningshål i en okänd bergformation. Oljeindustrins loggar är kalibrerade och utvecklade för sedimentärt berg med relativt stor kontrast mellan olika bergarter och höga porositeter (jämfört med granit). För kalibrering av resultat användes mätningar på borrhålskärnor från borrhålet. Jämförelse gjordes också med tillgänglig information avseende geofysisk loggning i kristallint berg.

Syftet med loggningen var främst att få information om:

- Bergarter.
- Mineralogi.
- Sprickzoner.
- Orientering på sprickzoner och enskilda sprickor.
- Indikationer på permeabelt berg.
- Data för utvärdering av seismiska och gravimetriska undersökningar.
- Korrelation av djup med geologisk information baserat på borrhaxanalys.
- Borrhålets geometri, lutning och ellipticitet.
- Kvaliteten på cementering bakom foderrör.

Kompleta loggningsprogram genomfördes före installation av foderrör vid 4 167 m och 5 799 m djup. I intervallet 0–1 250 m och under omborrhningarna i de djupare delarna av borrhålet utfördes begränsade loggningsprogram, bland annat på grund av stor risk för fastsättning av instrument.

Med hänsyn till förutsättningarna – ett elliptiskt borrhål och ett kraftigt lutande borrhål under 5 000 m – genomfördes de geofysiska loggningarna utan större svårigheter. Vid ett tillfälle förlorades delar av utrustningen (mätarmar) men inget instrument fastnade i borrhålet.

Under stilleståndet i borrhningen utfördes en temperaturmätning med utrustning och personal från ett universitet. Under mätningen fastnade instrumentet. Mätinstrument och 4 000 m mätwire kunde inte fiskas upp ur borrhålet utan det blev nödvändigt att borra om 609 m borrhål.

Hydrauliska tester i borrhålet

För att bestämma geohydrologiska förhållandena i bergmassan, främst hydraulisk konduktivitet och bergvattnets kemiska sammansättning, utfördes hydrauliska mätningar i borrhålet med följande metoder:

- Trycktester (“Leak off tests”).
- Trycksänkning mellan manschetter (“Drillstem test”).
- Pumptest.

Trycktester (Leak Off Test)

Denna typ av trycktestning innebär att borrhålet trycksätts och att trycksänkningen i borrhålet registreras under en given tid. Mätning utfördes för att verifiera att cementeringen av foderrören var riktigt utförda samt för att verifiera förekomsten av konduktiva sprickzoner. Mätningen omfattar, vid en given tidpunkt, hela borrhålsvolymen, som inte är infodrad med foderrör.

Då borrhätskan bestod av vatten (ner till 3 930 m) är det med denna typ av mätning möjligt att bestämma bergmassans genomsnittliga hydrauliska konduktivitet. Om borrhätskans viskositet ökas genom tillsatser erhålls en kvalitativ bedömning av bergmassans konduktivitet.

Totalt genomfördes 11 tester. Den genomsnittliga hydrauliska konduktiviteten i intervallet 1 250 och 3 165 m beräknades, baserat på trycktestning, till ca 2×10^{-10} m/s.

Trycksänkning mellan manschetter (DrillStem Test)

Trycksänkning mellan manschetter utfördes vid 5 tillfällen. Avståndet mellan manschetterna varierade mellan 8 och 65 m. I samband med testningen var det också möjligt att ta vattenprover från berget. Resultatet av testningen framgår av tabell 5-5.

Tester med expanderande manschetter i borrhålet blev svåra och riskabla att utföra i det elliptiska borrhålet. På grund av risken för fastsättning utfördes inga tester i öppet borrhål under 3 000 m.

Prov på vatten från berget utfördes vid de lyckade testerna enligt tabell 5-5. Värt att notera är, att opåverkat prov på vatten med hög salthalt erhöles vid testningen under 5 453 m.

Pumptest

Gravbergsborrningen avslutades med ett längre pumpstest under år 1990. Pumpningen omfattade borrhålsavsnittet mellan 5 278 och 6 941 m. Genom pumpning under längre tid var målsättningen att få ett inflöde av eventuella gaser samt att ta ostörda vattenprover från berget. Pumpningen lyckades och analyser av erhållet vatten gav liknande resultat som vid tidigare test genom trycksänkning mellan manschetter (kloridhalt på maximalt 99 000 mg/liter vatten uppmättes).

Erfarenheter från borrningen av Gravberg-1

Sammanfattning av borrningen

Framdriften och de viktigaste händelserna under borrningen redovisas i figur 5-6. Nedan ges en kort beskrivning av borrningen och de problem som uppstod. Av beskrivningen framgår det att borrningen generellt gick bra ner till ca 5 km. Mellan 5 och 6,5 km gick det visserligen att borra men med kraftigt ökande problem mot djupet. Under 6,5 km var borrningen både besvärlig och extremt riskabel, vilket bland annat resulterade i tre omborrningar.

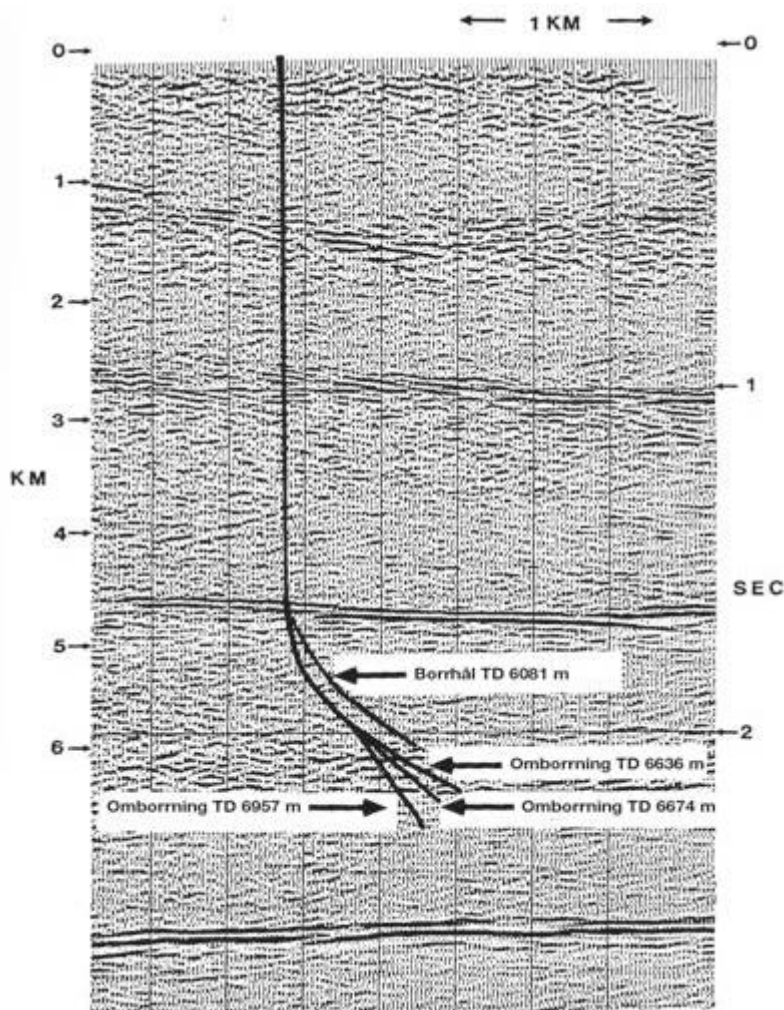
Borrhålet Gravberg-1 med omborrningar illustreras i figur 5-5, som även redovisar de seismiska reflektorer. Angivna nivåer avser borrad längd. Detta innebär att borrhålets vertikala djup är något mindre i de djupare delarna av borrhålet (under ca 5 000 m) på grund av verklig borrhålslutning.

Borrningen gick planenligt ner till 1 250 m där foderrör installerades.

Under borrningen gick borrhålssträngen av tre gånger. Brotten orsakades av läckage i skarvar mellan borrhålssträngen och av en extremt nötande borrhåtska, som slipade av borrhålssträngen. Den nedre delen av borrhålssträngen kunde fiskas upp utan större problem.

Tabell 5-5. Trycksänkning mellan manschetter i Gravberg-1.

Intervall, m	Konduktivitet, m/s	Kommentar
1 303–1 355	$7,85 \times 10^{-10}$	Lyckad test
1 496–1 566	–	Läckage runt manschett
1 949–2 011	$3,65 \times 10^{-10}$	Lyckad test
2 855–2 882	–	Läckage runt manschett
5 453–borrhålsbotten	$0,07 \times 10^{-10}$	Test med en manschett som placerades i foderrör. Stora osäkerheter föreligger avseende beräknade konduktivitet pga. borring med oljebaserad borrhåtska med stor tyngd.



Figur 5-5. Borrhålet Gravberg-1 inklusive omborrningar. (Juhlin 1991).

1 250–4 167 m, borrhning med 12,25 tums (311 mm) borrhkrona

Efter installation av foderrör fortsatte borrhningen ner till 3 000 m, planerat läge för nästa foderrörsinstallation och byte till 8,5 tums (216 mm) borrhkrona. Då borrhningen gick utan problem togs beslutet, efter undersökningar i borrhålet, att borra vidare med 12,25 tums (311 mm) borrhkrona.

Borrhningen fortgick utan problem ner till ca 3 800 m där problem uppstod med ökade vridmoment och kort livslängd för borrhkronorna. Vid ett djup av 3 939 m blev det omöjligt att fortsätta borrhningen. Undersökningar i borrhålet påvisade stora utfall och ett instabilt borrhål. Borrhningen kunde fortsätta efter att borrhålet stabiliserats med cement och med en borrhvätska med tillsats av polymerer och bariumsulfat. Efter borrhning med liten borrsjunkning installerades foderrör i borrhålet vid ett djup av 4 167 m.

4 167–6 081 m, borrhning med 8,5 tums (216 mm) borrhkrona

Borrhningen ner till 5 000 m gick relativt bra men med kontinuerligt ökande vridmoment och friktion i borrhålet. Vid 5 000 m lutade borrhålet ca 20 grader. Under 5 000 m ökade vridmomentet och friktionen i borrhålet snabbt och vid 5 675 m gick borrhstängningen av. Efter fiskning fortsatte borrhningen under stora problem ner till 6 081 m där borrhsträngen återigen gick av, nu på 4 689 m. Fiskningen misslyckades och det blev nödvändigt att borra om borrhålet.

Omborrning 1, 4 639–5 799 m, borrhning med 8,5 tums (216 mm) borrhkrona

Omborrningen gick bra ner till 5 799 m. Beslut togs att säkra borrhålet med foderrör. Vid installationen fastnade foderröret på 5 435 m.

Omborrning 1, 5 799–6 636 m, borrhning med 6,5 tums (165 mm) borrhkrona

Borrningen gick bra ner till 6 128 m där borrhsträngen gick av. Vid upptag av borrhsträngen ur borrhålet för kronbyte fastnade borrhsträngen på 5 958 m. Efter flera fiskeförsök (21 st) blev det möjligt att fortsätta borrhningen. Under 6 400 m uppstod stora borrhproblemen med ett elliptiskt och lutande borrhål och med stora svårigheter att rengöra borrhålet. Borrhsträngen gick av vid 6 636 m i samband med ett försök att stabilisera borrhålet med cement på en nivå av 6 402 m. Fiskningen misslyckades och borrhsträngen separerades på 6 138 m.

Omborrning 2, 5 991–6 600 m, borrhning med 6,5 tums (165 mm) borrhkrona

För att erhålla mindre friktion i borrhålet och bättre borrhålsrengöring utfördes omborrning 2 med en dieselbaserad borrhväska (dieselolja).

Efter svårigheter att borra ut ur den befintliga borrhålsväggen påbörjades omborrningen på 5 991 m djup. Med den oljebaserade borrhväska gick borrhningen nu betydligt bättre och vridmomentet reducerades med 15 %. Lutningen på borrhålet minskade också, från 43 grader till 36 grader. På grund av finansiella problem avbröts borrhningen, 1987-09-01, vid en borrhad längd av 6 600 m, motsvarande ett vertikalt djup på 6 337 m.

Omborrning 3, 5 839–6 957 m, borrhning med 6,5 tums (165 mm) borrhkrona

Under stilleståndet i borrhningen utfördes en temperaturmätning i borrhålet. Under mätningen fastnade instrumentet och ca 4 km wire förlorades i borrhålet. Efter ytterligare finansiering återupptogs borrhningen sommaren 1988 (1988-07-18).

När borrhningen startade var det inte möjligt att rensa borrhålet från wire och instrument utan det blev återigen nödvändigt att borra om borrhålet, omborrning 3, från nivå 5 817 m. Borrningen gick bra ner till 6 943 m. Efter stora svårigheter fortsatte borrhningen ner till 6 957 m. På detta djup säkrades borrhålet med ett slitsat foderrör, 5 tum (127 mm), som under installation fastnade på 6 419 m. För att säkra hela borrhålet installerades ytterligare ett foderrör med dimensionen 2 875 tum (73 mm) inne i det grövre foderröret och ner till borrhålsbotten.

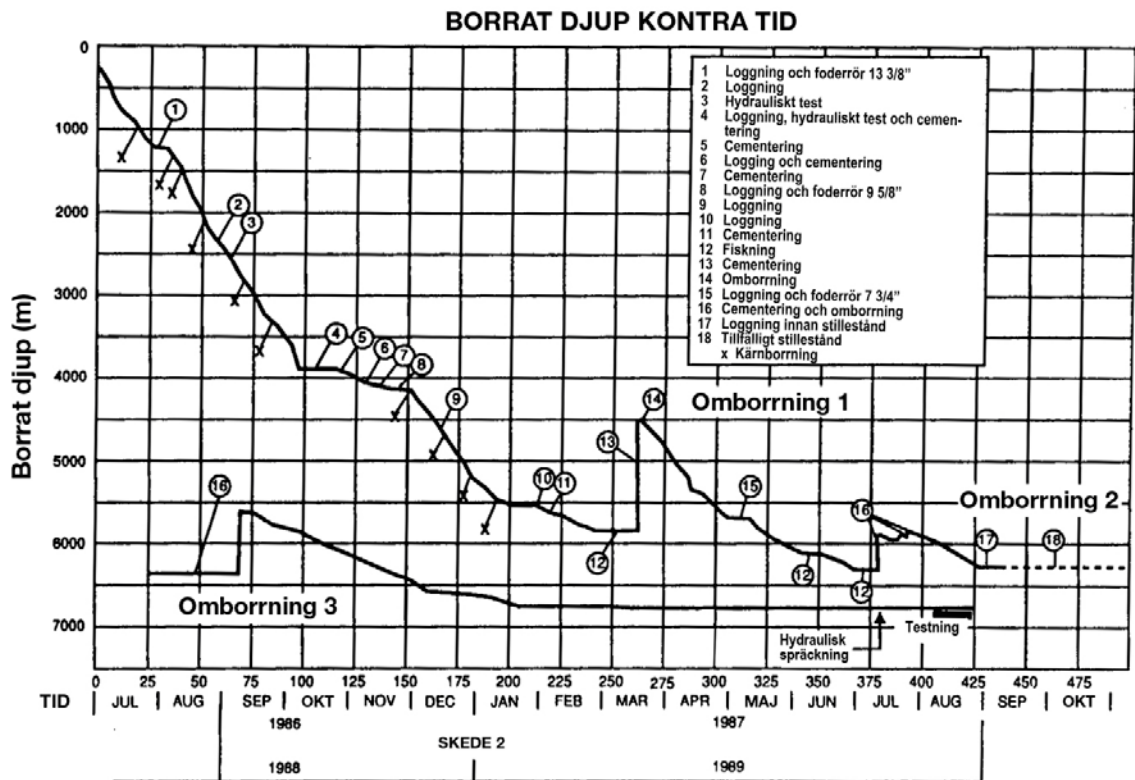
Borrhålets ellipticitet

Under 1 500 m djup är borrhålet mer eller mindre elliptiskt. Den långa sidan på borrhålet, som sammanfaller med riktningen på den minsta horisontella bergspänningsriktningen, är på långa sträckor 60–70 % större än den korta sidan, som sammanfaller med borrhålets diameter. Det elliptiska borrhålet orsakades av anisotropa bergspänningar och ett berg med relativt låg hållfasthet, exakt tryckhållfasthet på ca 140 MPa.

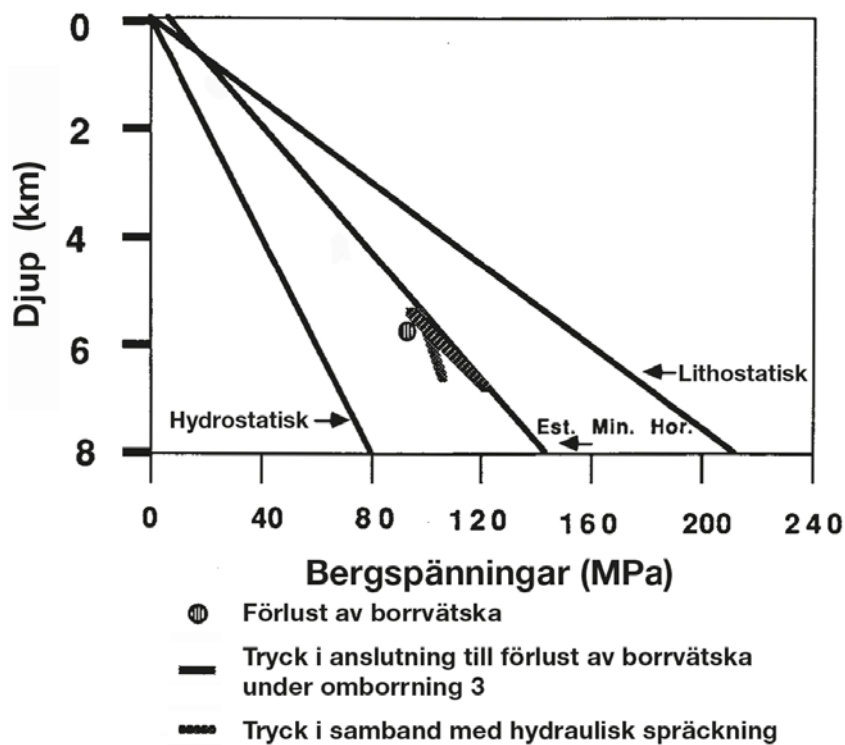
I samband med förundersökningarna utfördes bergspänningsmätningar i ett av kärnborrhålen med hjälp av hydraulisk spräckning. Resultatet visade på relativt låga bergspänningar i området jämfört med vad som är normalt i Sverige.

Under borrhningen utfördes inga bergspänningsmätningar, men baserat på andra tester och förlust av borrhväska (hydraulisk spräckning) bedömdes den minsta horisontella bergspänningen motsvara en gradient på ca 16,3 kPa per m. En bedömning av minsta horisontella bergspänningen framgår av figur 5-7.

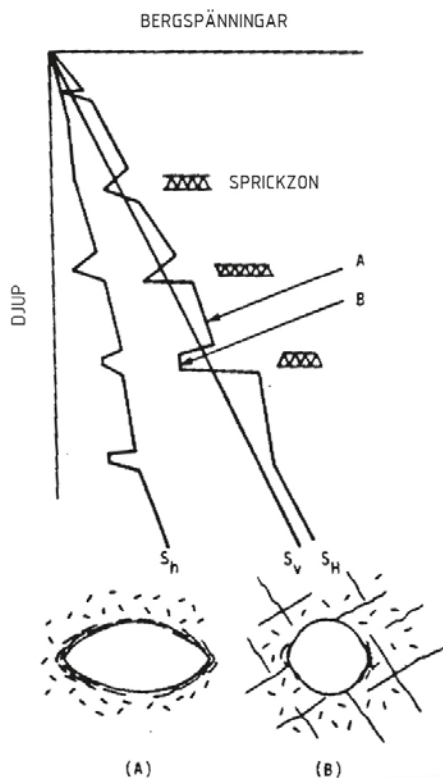
Baserat på mätning av formen på borrhålet (mätning med ”calliper”) och med en jämförelse med geologisk information framgår att ellipticiteten är mindre i anslutning till sprickzoner. Simulering av brottmekanismer visar på spjälkning i intakt berg, resulterande i ett elliptiskt borrhål, medan spänningarna i mera sprucket berg är lägre och mindre anisotropa, vilket resulterar i ett rundare borrhål. Bedömd modell för spjälkning i borrhålet framgår av figur 5-8.



Figur 5-6. Framdrift av borrhningen. (Juhlin 1991).



Figur 5-7. Bedömda bergspänningsförhållanden i Gravberg. Minsta horisontella bergspänningen markeras med Est. Min. Hor. (Juhlin 1991).



Figur 5-8. Bedömd modell för spjälkning i borrhålet. Bergspänningarna bedöms vara högre i intakt berg jämfört med i sprickzoner (A). S_h avser den minsta horisontella bergspänningen, S_H den största horisontella bergspänningen och S_v den vertikala bergspänningen. (Juhlin 1991).

Borrhålsstabilitet och borrhålsriktning

Ett instabilt borrhål var det största problemet under borrhningen av Gravberg-1. Många gånger var vridmomentet så stort nere i borrhålet att det inte gick att rotera borrhsträngen och vid flera tillfällen gick borrhsträngen av.

För att stabilisera borrhålet blev det vid några tillfällen nödvändigt att gjuta igen vissa delar av borrhålet med cement och sedan borra om dessa avsnitt; detta utfördes bland annat vid 3 939 m djup.

För att begränsa utfallen, stabilisera borrhålet och minska ellipticiteten ökades tyngden på borrhvåtskan kontinuerligt under 4 167 m. Med en ökande vikt begränsades utfallen något.

Ökningen av borrhvåtskans vikt resulterade i ofrivillig spräckning vid ett djup av ca 5 750 m och stora mängder borrhvåtska förlorades till berget (detta skedde också en gång under omborrning 3).

För att minska friktionen i borrhålet och för att förbättra borrhålsrengöringen utfördes omborrning 2 och 3 med en oljebaserad borrhvåtska.

Lutningen på borrhålet var mindre än 10 grader ner till 4 700 m. Under denna nivå ökade lutningen kontinuerligt för att stabiliseras kring 45 grader på 6 009 m djup. Den kraftiga ökningen av lutningen sammanföll med att borrhålsriktningen blev parallell med minsta huvudspänningsriktningen. Borrhålets lutning framgår av figur 5-5.

Lutningen mättes med mekaniskt instrument under borrhningen samt i samband med den geofysiska borrhålsloggningen.

För att begränsa lutningen på borrhålet prövades olika mekaniska konfigurationer av den nedre delen på borrhsträngen ("bottom hole assembly") och genom borrhning med lägre vikt på borrhkronan men utan resultat. De åtgärder som normalt tillämpas inom oljeindustrins fungerade inte i det elliptiska borrhålet.

Tabell 5-6. Sammanfattning av geovetenskapliga resultat.

Ämnesområde	Resultat
Seismiska reflektorer	De mycket markanta seismiska reflektorerna på ca 1,5, 3, 5 och 5 km djup består av horisontella diabasgångar.
Bergets sprickighet	Bergets sprickighet minskar med djupet.
Bergspänningar	Den minsta horisontella bergspänningen motsvarade en gradient på 16,3 kPa/m.
Bergmassans konduktivitet	Under 1 500 m djup m bedömdes den hydrauliska konduktiviteten till ca 2×10^{-10} m/s.
Fluidier	Prov på vatten från berget visade på höga salthalter under ca 5 200 m och maximalt uppmättes 99 000 mg/liter vatten i samband med provpumpning. En salthaltsprofil som funktion av djupet saknas.
Gas	Spår av gas påträffades i vid borrning genom de horisontella diabasgångarna.
Temperaturgradient	Temperaturen ökade med 1,61 grader per 100 m mellan markytan och 5 200 m och med 1,52 grader per 100 m mellan 5 200 m och 6 760 m.

Vid borrning med oljebaserad borrhväska reducerades lutningen något. Vid omborrning 2 uppmättes en minskning på lutningen från 45 till 36 grader. För att minska ellipticiteten bedömdes att det skulle krävas en borrhväska som på ett effektivt sätt bygger upp en så kallad mudkaka på borrhållsväggen.

Det lutande borrhålet medförde, tillsammans med utfall i borrhålet (elliptiskt borrhål), stora borrhproblem genom ökad friktion och stora svårigheter att fiska upp avbrutna borrhstänger vid brott. Borrning med bormotor och mekanisk styrning diskuterades som en möjlighet för att borra rakare, men detta prövades inte på grund av hög kostnad.

Kostnad för borrningen

Ingen detaljerad kostnadsuppföljning av borrningen av Gravberg-1 finns tillgänglig. Utgående från budgeten för Djupgasprojektet, 150 M SEK och en borrhstid på 450 dagar, är det emellertid möjligt att bedöma kostnaden per dag för borrningen av Gravberg-1 till 0,3 M SEK.

Geovetenskapliga resultat

Som framgår av den ovan gjorda beskrivningen insamlades en mängd data under borrningen av Gravberg-1. En sammanställning och analys av utförda undersökningar och erhållna vetenskapliga resultat finns redovisade i en sammanfattande rapport: "Scientific Summary Report of the Deep Gas Drilling Project in the Siljan Ring Impact Structure" (Juhlin 1991) med tillhörande ämnesspecifika underlagsrapporter.

I tabell 5-6 görs en kort sammanfattning av de viktigaste geovetenskapliga resultaten (enligt författarens bedömning). För ytterligare information hänvisas till Vattenfalls vetenskapliga redovisning av djupgasprojektet.

5.2.3 KTB – Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschlands

Referens för huvuddelen av detta avsnitt är den rapport "Deep boreholes with large diameter in crystalline rock" (Sperber 2007) som borrhingenjör A Sperber tagit fram åt SKB.

Syfte

Två borrhål med vetenskapligt syfte borrades i södra Tyskland med start 1987 för att undersöka fysiska och kemiska förhållanden och processer i jordskorpan. Borrplatsen är belägen i en gränsszon mellan två kontinentalplattor.

Borrningsteknologi

Målet med pilothål i KTB-projektets 2-hålsförfarande

I KTB-projektet skulle pilothålet ge följande vägledning för huvudhålet:

- a. allmän undersökning av den geovetenskapliga prognosen genom komplett kärnprovtagning, loggning, tester, analys av borrhax och borrhätska för att minimera den typ av tidsödande arbete i huvudborrhålet,
- b. att möjliggöra kontinuerlig borrning och styrning i huvudborrhålet för att åstadkomma ett rakt och vertikalt borrhål, speciellt i de övre delarna av huvudborrhålet,
- c. kunskapsuppbyggnad för problemlnivåer, temperatur och tryckgradient för att kunna projektera lämpligt foderrörsprogram för det huvudborrhålet,
- d. utprovning av borr- och loggningsverktyg för huvudborrhålet.

Därför skulle bormetoden för pilothålet vara i enlighet med följande krav:

- maximal kärnupptagning (core recovery) för att säkerställa att bästa möjliga geovetenskapliga analys av geologiska formationer och stratigrafi,
- minimum djup av 3 000 m med möjlighet att borra ner till 5 000 m,
- håldiameter vid fullt djup ska vara tillräckligt stor för att möjliggöra tänkbara loggar,
- avstånd till huvudborrhålet på ca 200 m för att säkerställa god korrelation mellan borrhålen, men också för att möjliggöra mellanhålexperiment i pilothål/huvudborrhål.

Pilothål – Planerat foderrörs-/borrprogram och genomförande

Programmet för foderrör och borrning var en kombination av konventionell rotationsborrnig (övre delen) och gruvborrnigsteknik (nedre delen). Bakgrunden till detta var att säkerställa maximalt kärnupptag med låg borrhaxkostnad.

Rullborrkronan 10 5/8×4 tum (271×102 mm) för kärnupptagning ger en kärna på 4 tum (102 mm). Kärnupptagningen utförs med hela upptag ("round trip") men eftersom djupet är måttligt var det acceptabelt.

Enligt foderrörsprogrammet planerades ett första foderrör till 400 m djup, men på grund av man träffade på en förkastningszon beslutades att sätta foderröret till 478 m och cementera till markytan.

För resterande borrnig ner till fullt djup planerades kärnborrnig med upptag med wire-line.

Eftersom geologin under 300 m var okänd och fullt borrhaxdjup ska nås med tillräcklig diameter, så planerades för att kunna installera en extra foderrörsdimension vid eventuella problem utan att diametern för det avslutande foderröret behöver minskas.

Borrigg för pilothål

En konventionell borrigg är inte lämpad i kombination med ett borrsystem för wire-line. Å andra sidan är inte de speciella borriggar som används för wire-lineborrnig möjliga att använda för 400 m borrnig av 10 5/8 tum (271 mm) borrhål och att hantera 3 000–5 000 m borrhax med dimensionen 5 1/2 tum (140 mm). Vidare skulle systemet för hantering av borrhätska på en konventionell borrigg inte ge tillräcklig rening. Det var därför nödvändigt att modifiera en befintlig borrigg för konventionell rotationsborrnig för att uppfylla de specifika krav som ställs i KTB-projektet.

Kärnborrnig av pilothål med wire-line

På grund av den relativt stora diameter som erfordras till fullt djup på mellan 3 000 och 5 000 m, och övriga krav i projektet, så utvecklades ett speciellt system för wire-lineborrnig.

För att mäta borrhålsavvikelse och temperatur under borrnig så utvecklades också ett mätverktyg som lagrade data under borrningsprocessen och som tömdes när borrhaxkärnan lyftes upp till markytan.

I samband med att man startade borrning av 6 tum (152 mm) dimension fick man problem med ökad avvikelser, vilket till stor del var orsakat av geologiska förhållanden och borrhålets stabilitet. Ett för stort borrhål innebar att borrhålet böjdes av relativt snabbt, och det är ett problem som är större vid borrning med mindre diameter.

För att stoppa den ökade borrhålslutningen och riktningförändringen och komma rätt igen, beslutades att använda styrd borrning vid tre tillfällen. Eftersom man dessutom misslyckades med att fiska upp utrustning så fick man även göra side tracks vid två tillfällen. Det innebar att ingen kärna kunde tas i dessa intervall i pilothålet, se nedan:

- | | | |
|--|----------------|----------------------------------|
| 1. styrd borrning | från 992,0 m | till 1 177,0 m |
| (kärna från 1 177–1 183 m) | från 1 183,0 m | till 1 228,9 m |
| 2. styrd borrning | från 1 816,4 | till 1 998,3 m |
| hålfyllning (pga. misslyckad fiskeoperation) | | till 1 677,0 m |
| 3. styrd borrning (side track) | från 1 677,0 m | till 1 802,0 m (VB 1a) |
| 4. styrd borrning | från 2 635,0 m | till 2 687,0 m |
| fiske, ”milling” | från 2 784,1 m | till 2 787,1 m |
| fiske, side track, rot.borrning. | från 3 893,0 m | till 4 000,1 m tot. djup (VB 1b) |

Vid utborrning ur borrhålet i samband med utförande av sidoborrning (side tracks) ut i det hårda berget så fick man mycket skarpt vinklade borrhål (s.k. dog legs). Upp till 5,5 °/10 m vid den första sidoborrningen och 4,1 °/10 m vid den fjärde styrda borrningen. De skarpt vinklade borrhålen innebar stort motstånd vid rotation och när man skulle lyfta/sänka borrarsträngen i 6 tum (152 mm) borrhålet. Detta resulterade i att motorn för att rotera borrarsträngen fick bytas ut till en specialbyggd kraftigare motor.

När man var på 3 893 m så gick borrarsträngen av och fick fiskas upp, vilket lyckades. Då upptäcktes allvarlig korrosion inuti borrhålen. Man bytte då ut de använda 5 ½ tums wire-line borrhålen mot 3 ½ tums rotary-borrör för det avslutande borrararbetet, och avstod från kontinuerlig kärnbörning på grund av svårigheter att hålla tid och budget.

Ett första pilothål borrades med kontinuerlig kärnprovtagning till 4 000 m djup. Det andra djupa borrhålet, huvudborrhålet, placerades intill pilothålet för att utnyttja den kunskap som fanns om berget och därigenom möjliggöra en god planering. Huvudhålet nådde 9 101 m.

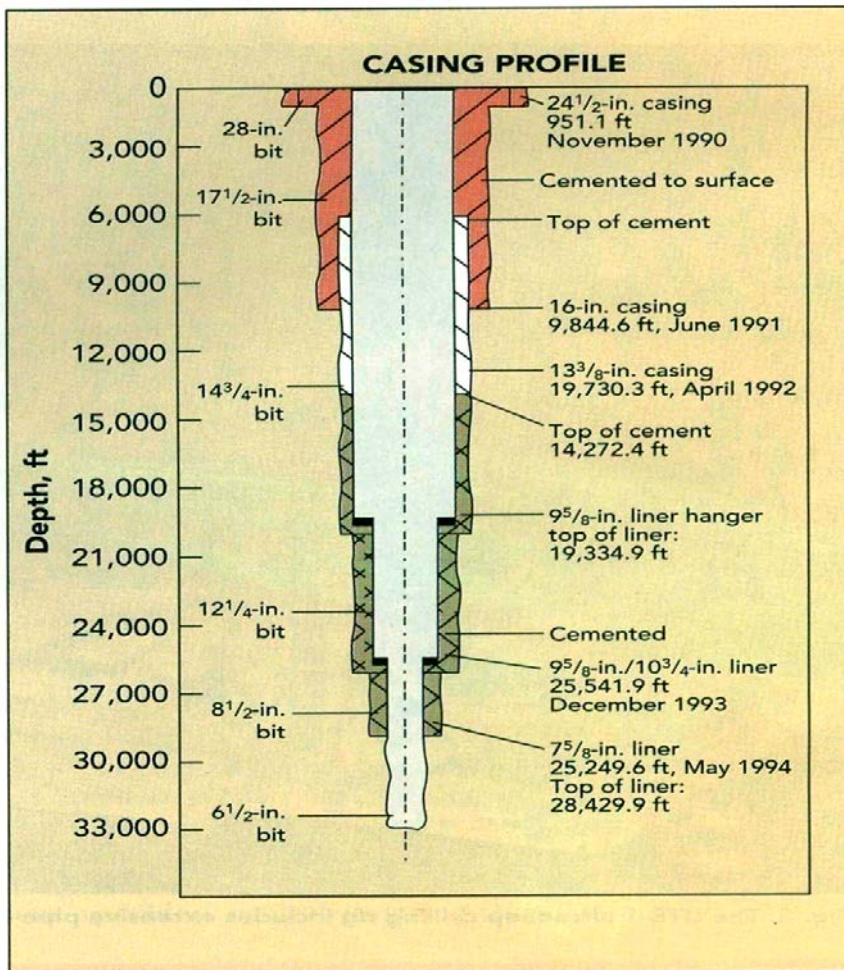
Huvudhålet – konstruktion

Olika lösningar för genomförande av borrning och foderrörsprogram undersöktes, och bland annat diskuterades den så kallade ”advanced open borehole sinking method” utvecklades av ryska Nedra. Utvärdering resulterade i att man valde det så kallade ”slim clearance casing concept” som innebär att man har en förhållandevis smal spalt mellan berg och foderrör. Genom att minska borrhålsdiametern kan den totala borrhålskostnaden hållas nere.

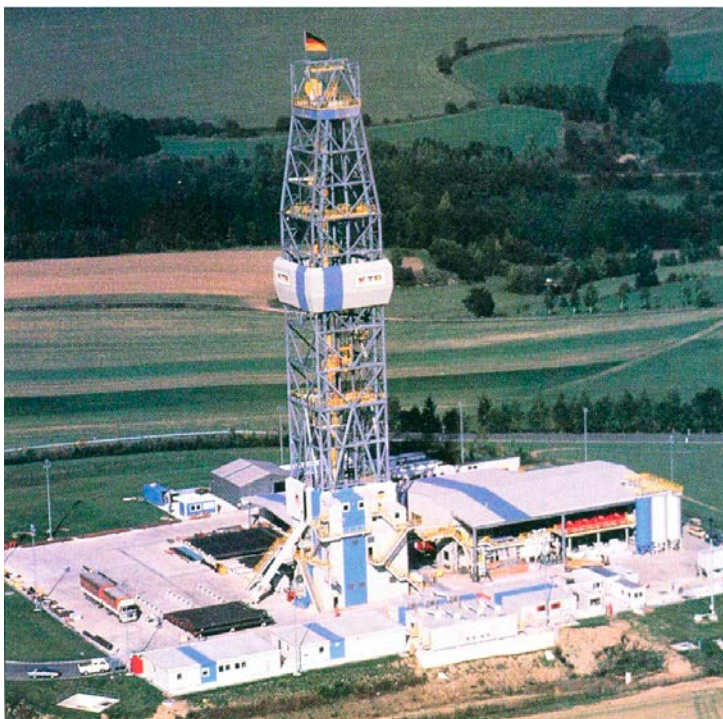
Slutliga dimensioner för borrhål (BH) och foderrör (FR) i huvudhålet blev enligt följande:

- BH 17 ½–28 tum (445–711 mm) FR 24 ½ tum (622 mm) till 290 m
- BH 17 ½ tum (445 mm) FR 16 tum (406 mm) till 3 000 m
- BH 14 ¾ tum (375 mm) FR 13 ¾ tum (340 mm) till 6 014 m
- BH 12 ¼ tum (311 mm) FR 9 5/8–10 ¾ tum till 7 785 m
(244–273 mm)
- BH 8 ½ tum (216 mm) till 8 730 m FR 7 5/8 tum (194 mm) till 8 665 m
- BH 6 ½ tum (165 mm) till 9 101 m FR 5 ½ tum (140 mm) till 9 031 m

Borrhålsprofilen visas i figur 5-9, och det kan konstateras att borrhålsdiametern 375 mm (14 ¾ tum) är borrat till 5 900 m (19 335 ft), och därefter med mindre storlek. Med en specialbyggd borrhålsrigg, se figur 5-10, så genomfördes borrarbetet av huvudhålet till 9 101 m, med i huvudsak rotationsbörning.



Figur 5-9. Borrhållets uppbyggnad (KTB-Huvudhålet). (Sperber 1994).



Figur 5-10. Borrrigg för genomförande av KTB-hålet till 9 101 m djup. (Sperber 1994).

Vertikalborrning

Vid utredningar då man tittat på andra djupa borrhningar i kristallint berg som Kola SG-3, Gravberg 1 och pilothålet inom KTB, så kunde man se vilken stor betydelse det har för projektets framgång att borra rakt. Med hänsyn till detta så framstod det klart att målet med projektet endast skulle kunna nås om man borrade ett rakt och vertikalt borrhål, speciellt i den övre delen.

Därför lades stor kraft på att utveckla strategier och verktyg för att minimera borrhålets avvikelser från vertikalplanet, även vid ogynnsamma geologiska förhållanden.

Erfarenheten från användning av dessa verktyg visade att de fungerade som förväntat och man lyckades hålla ett rakt och vertikalt borrhål, även om de geologiska förhållandena var ogynnsamma med lutande strukturer. Resultaten var goda ner till 7 000 m och lutningen var 0,5° generellt. Det ska också påpekas att i de djupare delarna, då vertikalstyrningen togs bort, ökade vinkeln mycket snabbt till ca 20° vilket innebar mycket friktionsmotstånd under borring.

Huvudhål – Erfarenheter från borrhålsstabilitet och borrhväska

I pilothålet och huvudhålet genomfördes bergspänningsmätningar som uppvisar en kraftig anisotropi, se tabell nedan.

Den kraftiga anisotropin innebär att berget hållfasthet överskrids under ett viss djup, och de utfall som det orsakade innebar problem vid borring i den undre delen av borrhålet. Analytiska beräkningar och simuleringar visade att den troliga brottmekanismen var spröda skjuvbrott i naturliga svaghetsplan.

Stabilitetsproblemen på de större djupen var orsaken till att man inte nådde det planerade djupet 10 000 m, och förutom de borrhproblem som dessa orsakade så innebar det också tidsförlängning och kostnadsökning som man inte var beredd att ta.

Den så kallade kaliperloggen, som mäter borrhålets geometri, uppvisar förhållandevis stora avvikelser mot teoretisk geometri, speciellt under 5 000 m djup, figur 5-11.

Den minsta diametern är ungefär lika stor som borrhkronan, men den största är betydligt större. Jämför figur 5-1.

Erfarenheter

Pilotborrningen drabbades av problem med avvikelser från vertikalplanet och vid tre tillfällen valde man att ta till styrd borring för att rätta upp borrhålet. Därutöver genomfördes två side tracks på djupare nivåer på grund av misslyckade fiske-operationer.

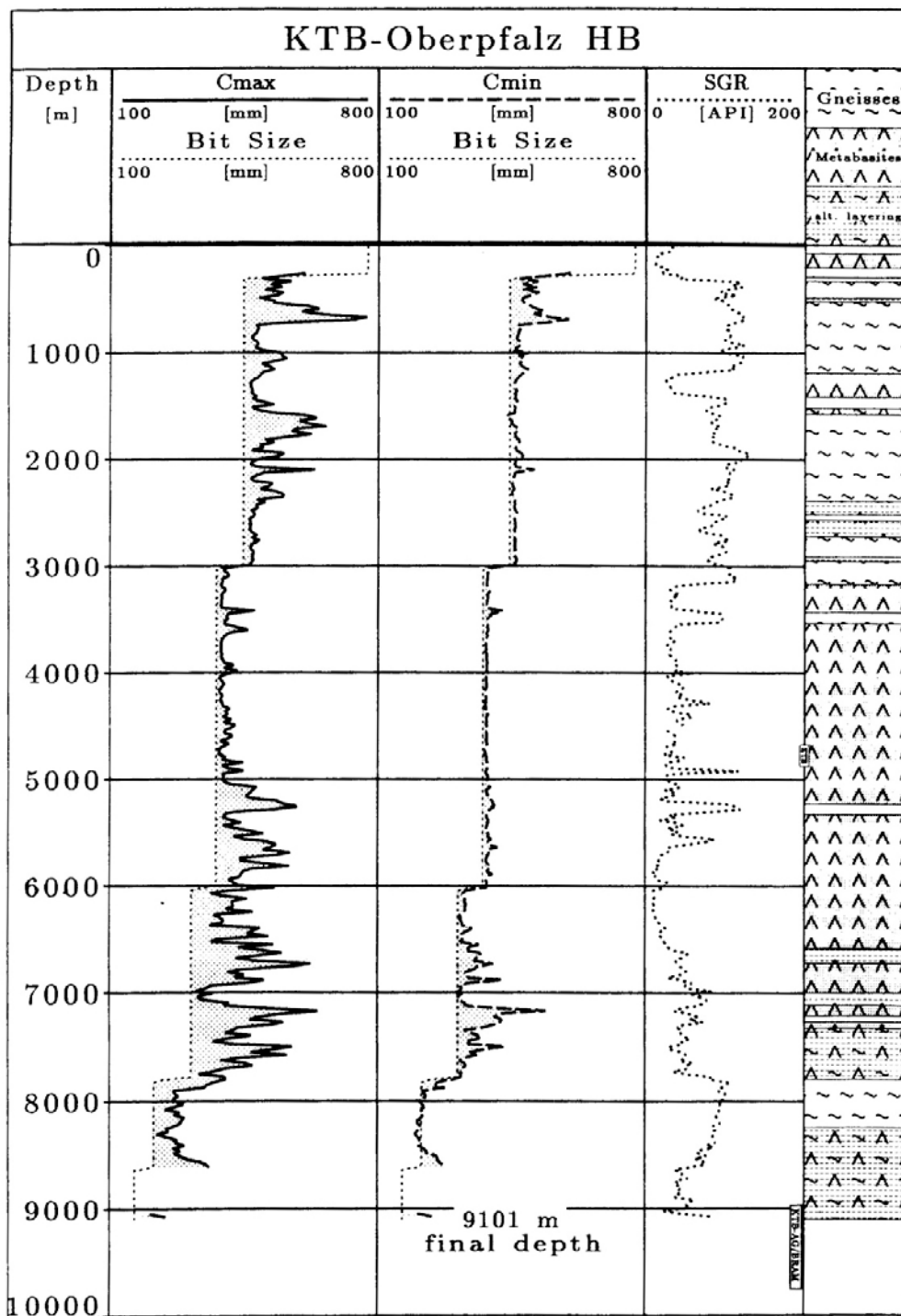
För huvudborrningen gick det mycket bra till ca 5 000 m djup, borrhålet var både rakt och vertikalt samt inga stora problem med stabiliteten i borrhålet. Därefter orsakade i första hand bergspänningar problem med stabilitet i borrhålet samt avvikelser från horisontalplanet.

Tabell 5-7. Bergspänningar.

depth (m)	magnitude of main horizontal stresses			direction of frac
	minimum σ_h (MPa)	maximum σ_H (MPa)	anisotropy factor σ_H/σ_h	azimuth** (°)
805,0*	25,0	49,4	1,98	156
1 270,0*	29,6	58,2	1,97	148
2 010,0*	> 30,3	> 60,6	> 2?	?
2 851,0*	51,1	103,0	2,01	150
2 928,5*	46,7	94,2	2,03	154
2 961,5*	47,4	94,0	1,98	139
3 011,0*	48,7	98,7	2,03	148
6 000,0	110,0	219,2	1,99	?
9 066,0°	147,0	285,0	1,94	?

* measured in pilot hole KTB-Oberpfalz VB
° final experiment phase KTB-Oberpfalz HB

** according to FMI/FMST

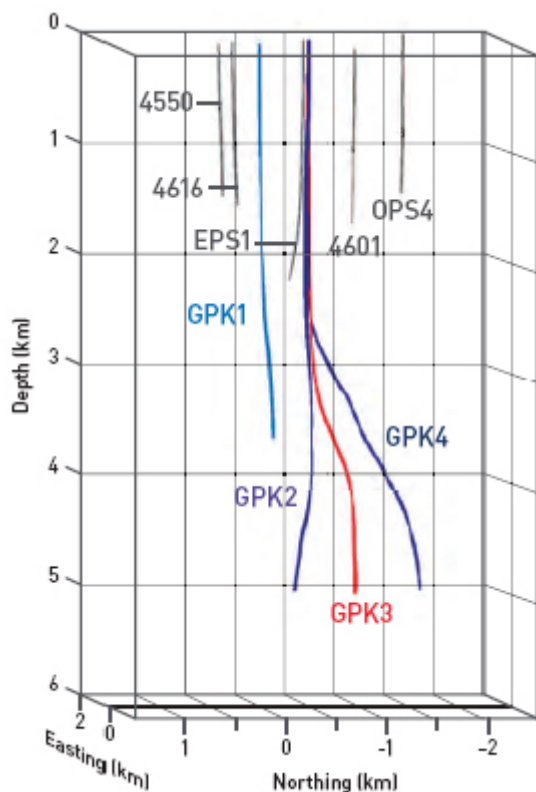


Figur 5-11. Verklig borrhålsprofil från caliperdata. Stora breakouts (utfall) i borrhålet orsakade problem på djup större än 5 000 m. (Sperber 2007).

5.2.4 Geotermiprojekt i Frankrike – Soultz

Syfte

Under 1987 tog Europeiska kommissionen beslut att satsa på ett projekt för geotermisk energi från kristallint berg, så kallad Hot Dry Rock, i Soultz i norra Frankrike. Förutom finansiering från EU så bidrog inledningsvis även Tyskland, Storbritannien och Frankrike med nationella medel och forskarsatser. Berggrunden består av sediment till 1 400 m och därunder graniter. Första borrhålet, GPK1 borrades 1987 till 2002 m djup, med problem som styrning, förlorad spolvätska och att man fastnade. Dessutom överskreds budgeten.



Figur 5-12. Hål borrade för geotermisk energi (HDR) i Saultz, Frankrike. (MIT 2006).

Borrningsteknologi

Totalt har fyra hål borrats till stort djup, GPK1–GPK4, med det senaste till 5 000 m och den sägs vara det längsta kontrollerat krökta borrhålet i granit i världen, se figur 5-12 som visar borrade profiler.

Erfarenheter

Vissa slutsatser avseende borrarsteknik har dragits från Saultz-projektet (MIT 2006):

- Man kan borra djupa hål i hårt kristallint berg, kontrollera deras riktning och logga dem.
- Vissa aspekter måste man fortfarande jobba med och det rör sig i första hand om problem med styrning av borrhålsmotorer för höga temperaturer i djupa borrhål.

Det bör också konstateras man har haft problem som orsakat stora förseningar och därigenom förmodligen också kostnadsökningar.

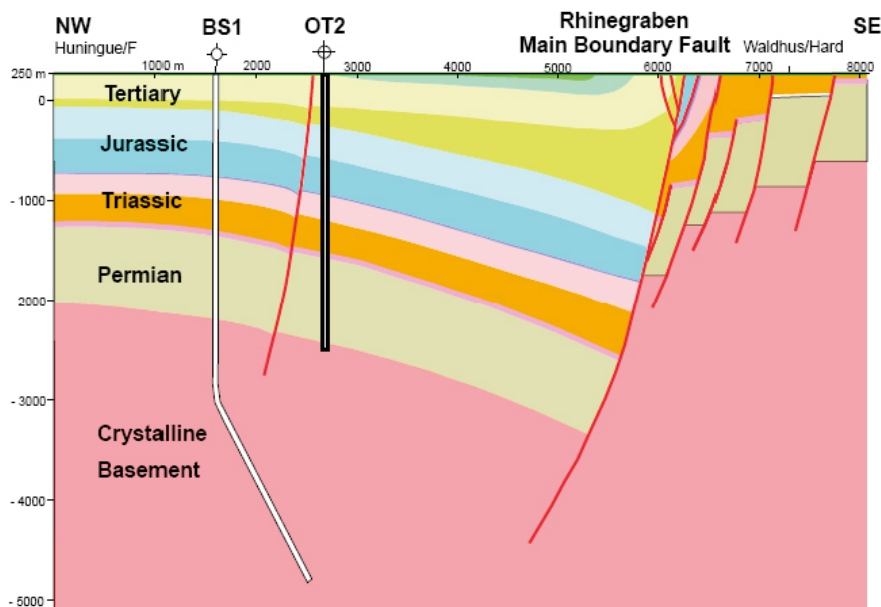
5.2.5 Geotermiprojekt i Schweiz – Basel

En pilotanläggning med geotermisk energi, Hot Dry Rock har uppförts i Basel. Man avslutade borrhålet oktober 2006 till 5 000 m för att genomföra tester och hydraulisk spräckning av berget. Berggrunden i området består av sedimentära formationer till 2 500 m djup som överlagras graniter.

Borrningsteknologi

Borrtekniken är rotationsborring med direktspolning med målet att använda konventionell utrustning och metod så långt möjligt.

Utan att ha fått ta del av borrhålskonstruktionen i detalj har det framkommit att man gått igenom 200 m av graniten med 14 ¾ tum borrhål (374,7 mm) och därefter satt 10 ¾ tum (273 mm) liner för att avsluta med borrar borrhål i dimensionerna 9 7/8 tum (250,8 mm) till TD 5 009 m.



Figur 5-13. Geologisk profil med borrhningen BS1 till 5 000 m. (Haring 2012).

5.2.6 Lund Djupgeotermi (DGE#1)

Syfte

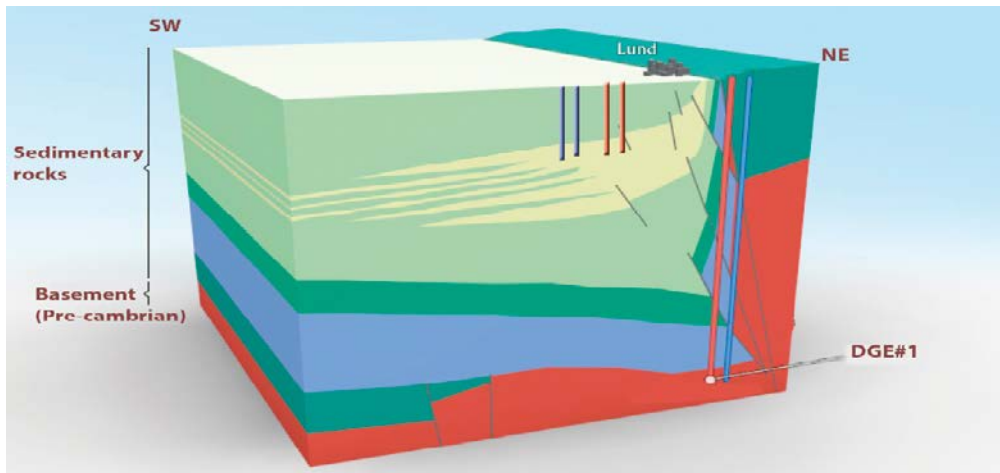
Geologiska förutsättningar att utvinna högtempererad geotermi från relativt stora djup, ca 3 500 m med temperaturer på 120–130 °C, har bedömts finnas i Lundaområdet. Lund har redan idag ett större geotermsystem med lågtemperatur med 9 aktiva hål till 550–750 m djup som genererar en temperatur på ca 20 °C. Med ett högtemperatursystem skulle andelen geotermisk energi öka väsentligt i Lunds Energis fjärrvärmesystem.

För att verifiera djupgeotermin behövdes en fullskaleboring till aktuellt djup. Lund Energi genomförde projektet ”Djupgeotermi i Lund” och själva borrhningsprojektet var ett samarbete mellan Lunds Energi och Avdelningen för Teknisk Geologi vid Lunds Tekniska Högskola och genomfördes huvudsakligen mellan 2:a kvartalet 2001 och slutet av 2003. Stöd lämnades från Energimyndigheten och syftade att stödja utvecklingen av ny borrhsteknik för kostnadseffektiv borrhning till stora djup i urberg, vilket bedöms ge ökade förutsättningar för användning av geotermisk energi i Sverige.

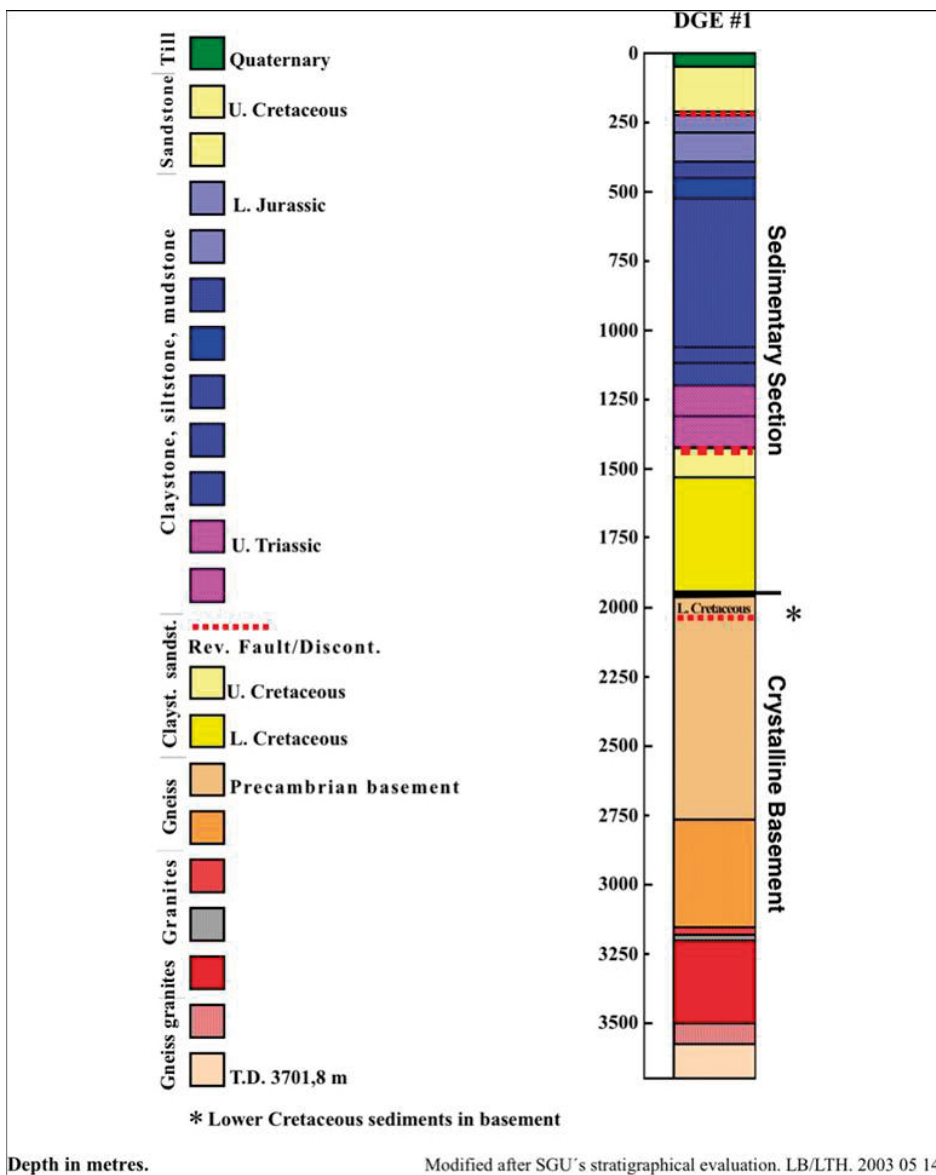
Delar av Skåne tillhör i ett geologiskt perspektiv den kontinentala delen av Europa. Gränzonen mellan urbergsskolden i norr och de kontinentala avsättningsbassängerna går i den så kallade Tornquist-zonen. I bergmekanisk mening är zonen en deformations- och brottzon, och sammantaget har det gett förutsättningar för djupgeotermi i Skåne. De uppspruckna bergmassorna i kombination med långsträckta och djupgående sprickor skapar grunden för vattenfyllda system till stort djup och med en stor volym. De seismiska mätningarna som utförts öster om Lund visade att åtminstone den västra begränsningen av Romeleåsen kunde ha dessa förutsättningar, figur 5-14.

Den termiska gradienten bedömdes vara 30–35 °C per km i det aktuella området och baserat på tillgängliga geologiska data bedömdes det möjligt att finna lämpligt tempererat vatten för direktväxling till fjärrvärmesystemet på ca 3 500 m djup i den aktuella förkastningszonen.

Urberget vars överyta är på ca 1 950 m djup består, enligt figur 5-15, av gnejser, graniter och gnejsgraniter, det vill säga hårda kristallina bergarter.



Figur 5-14. Schematiskt tvärsnitt genom berggrunder under Lund. Djupgeotermihål DGE#1 planerades tränga ner till spricksystem i urberget. Borrhål till vänster visar lågtemperatursystem som borrades på 1980-talet (550–750 m djup) (Bjelm och Rosberg 2006).



Figur 5-15. Geologisk profil som visar att urberget från ca 2 000 m består av gnejs, granit och gnejsgraniter (Bjelm 2007).

Borrningsteknologi

Olika borrar tekniker prövades, vilket också var ett av delmålen med projektet och anledningen till att Energimyndigheten stöttade projektet.

Rotationsbörning med direktspolning av borrvätska

Börningen inleddes med att den sedimentära sekvensen med lösare bergarter borrades med konventionell rotationsbörning och tung bentonitbaserad borrvätska, och därefter ytterligare 166 m med samma system. Penetrationshastigheten eller borrarjunkningen var i medeltal 3,5 m/tim och under 1 m/tim i urberget, både med 17 ½ tum (445 mm) och 12 ¼ tum (311 mm) borrar krona.

Borrhålsmotor

På grund av den låga borrarjunkningen beslöts att pröva en annan typ av borrhålsmotor, där borrvätskan driver en motor strax ovanför själva borrar kronan. Borrören roterar normalt inte då man kör borrhålsmotorn. Genom det högre varvtalet på borrar kronan förväntas normalt en högre borrarjunkning. Den nya borrhålsmotorn ökade borrarjunkningen till mellan 2 och 2,5 m/tim innan den havererade på grund av oaktsamhet från borrararen enligt projektet.

Hammare för borrvätska

Vid 3 611 m skulle en borrhålshammare från Wassara provas. Den gick emellertid inte igång när börningen skulle starta, och det visade sig senare att orsaken var ören borrvätska som satte igen en ventil i hammaren. Vidare hade kolven fått repor av något hårt material, vilka slipades ner och kolven var iordningsställd till försök nr 2. Vid 3 666 m startade nästa försök och resulterade i en borrarjunkning på 3 m/tim i snitt, men endast 9,4 m börning innan den stannade. Orsaken denna gång var något plastmaterial som smält och satt igen en ventil.

Rotationsbörning med luft

För att kunna borra med luft krävs stora kompressorer, varför fyra stycken större kompressorer med integrerad booster hade hyrts in från USA. Deras kapacitet var 1 200 cfm (cubic feet/min) vid 90 bar och maximalt 140 bar. Borrarjunkning var i snitt mellan 2 och 3,4 m/tim beroende på formationen, men upp till 15 m/tim. Jämförelsevis kan nämnas att man vid motsvarande börning med borrvätska och samma typ av borrar krona hade en borrarjunkning på 0,6 m/tim.

Borrar kronorna slits fort med denna metod, och måste bytas efter ca 30–40 tim eller i meter räknat efter ca 125 meter.

Kostnaden för att hyra kompressorpaketen var 28 000 kr/dygn inklusive extra personal. Till det kommer en dieselförbrukning på i storleksordningen 10 m³ per dygn vilket vid tidpunkten för när börningen genomfördes innebar en kostnad på nästan 60 000 kr.

Metoden har använts i västra USA i årtionden vid djupbörning i kristallint berg. Metoden är en underbalanserad borrar metod, vilket innebär att trycket i borrhålet är lägre än i omgivande formation.

Lufthammare

En annan underbalanserad borrar metod som provades är med lufthammare. För syftet införskaffades en lufthammare av modell Numa Challenger 125 och två 12 ¼ tum (311 mm) hammarbollar kronor. På djupet 2 878 m inleddes försöket och 94 m borrades med en borrarjunkning på 2,6 m/tim i medeltal. Momentanhastigheter på upp till 16 m/tim registrerades

Försöket avslutades då hammaren slutade fungera, vilket berodde på att ett nylonrör lossnat inuti hammaren.

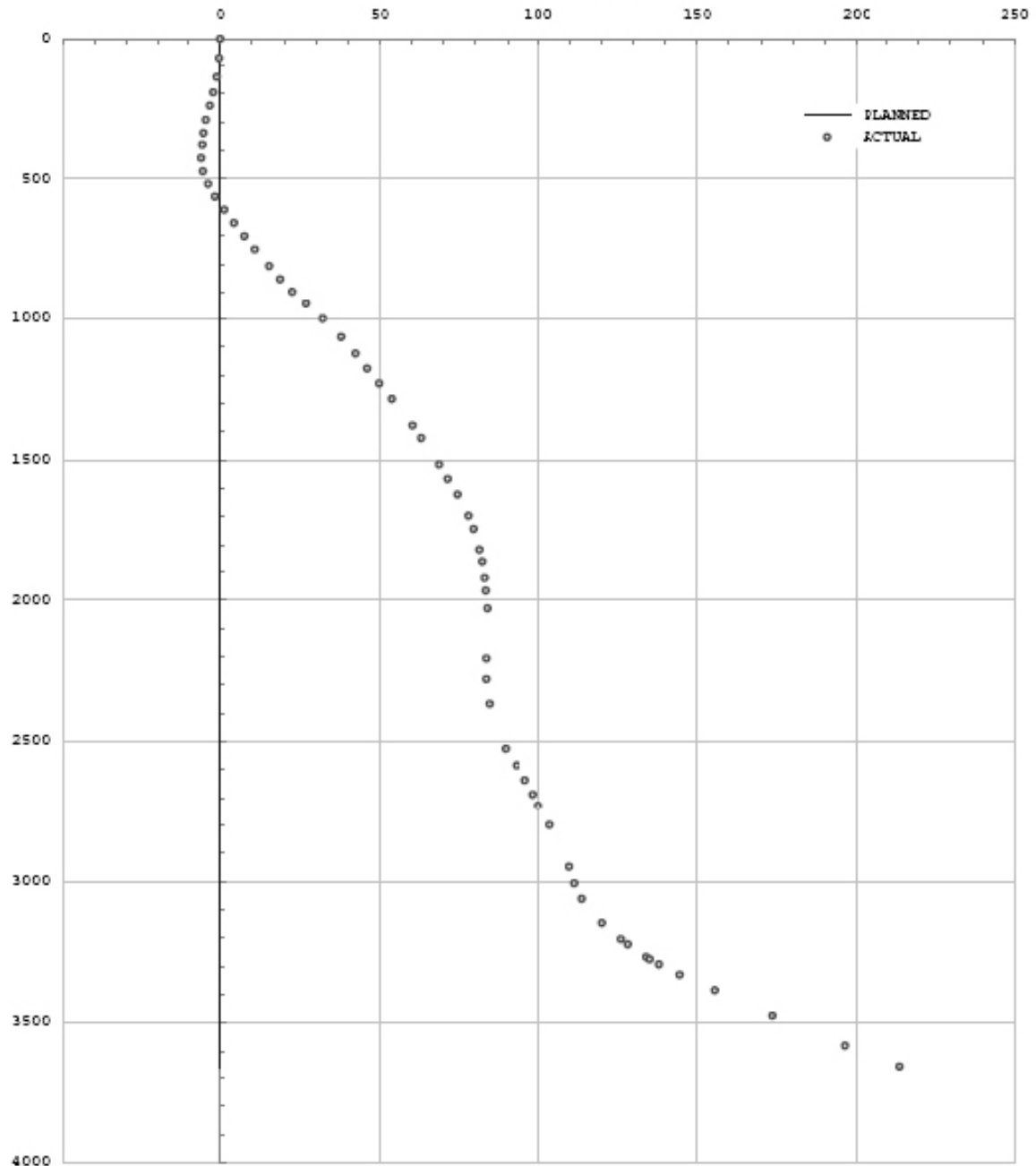
En fördel med hammarbörning är att borrar kronorna håller längre varför man inte behöver ta upp borrarsträngen lika ofta för kronbyte med den metoden.

Luftat vatten (aerated water)

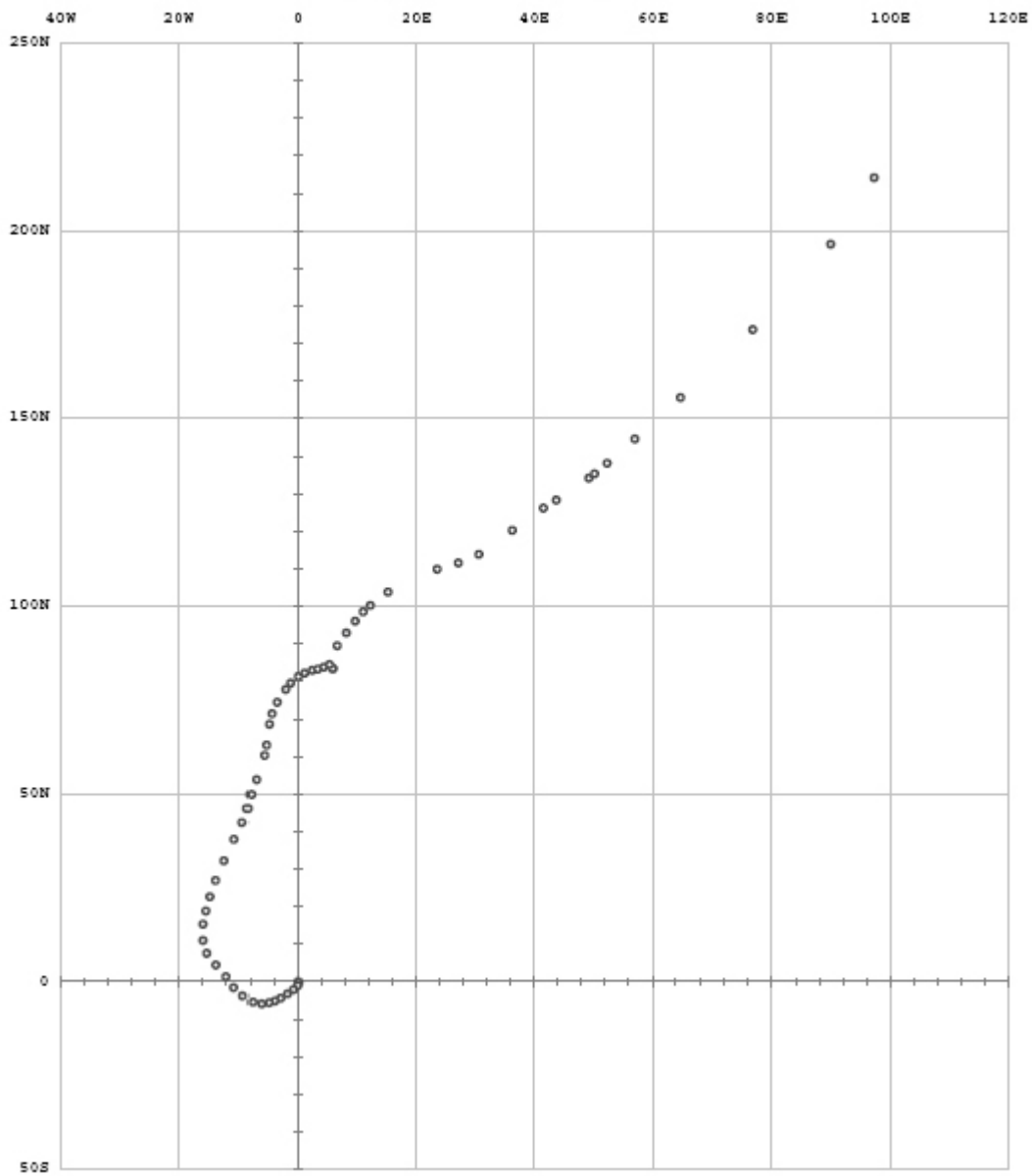
Utan att ha planerat för denna typ av borrning så var det en situation vid 3 100 m djup då vattenproduktionen från borrhålet ökade samtidigt som dammarna var fulla. Genom att samtidigt borra med vatten och blåsa ner luft blir vattenpelaren i borrhålet lättare och därmed förväntas borrningen gå snabbare. Borrsjunkningen blev dock endast ca 0,6 m/tim,

Rakhet och vertikalitet

Borrhålets vertikalitet och raket påverkas såväl av hur borrningen är genomförd som av de geologiska förutsättningarna. Deviationsmätningar i DGE#1 visas i figurerna 5-16 och -17.

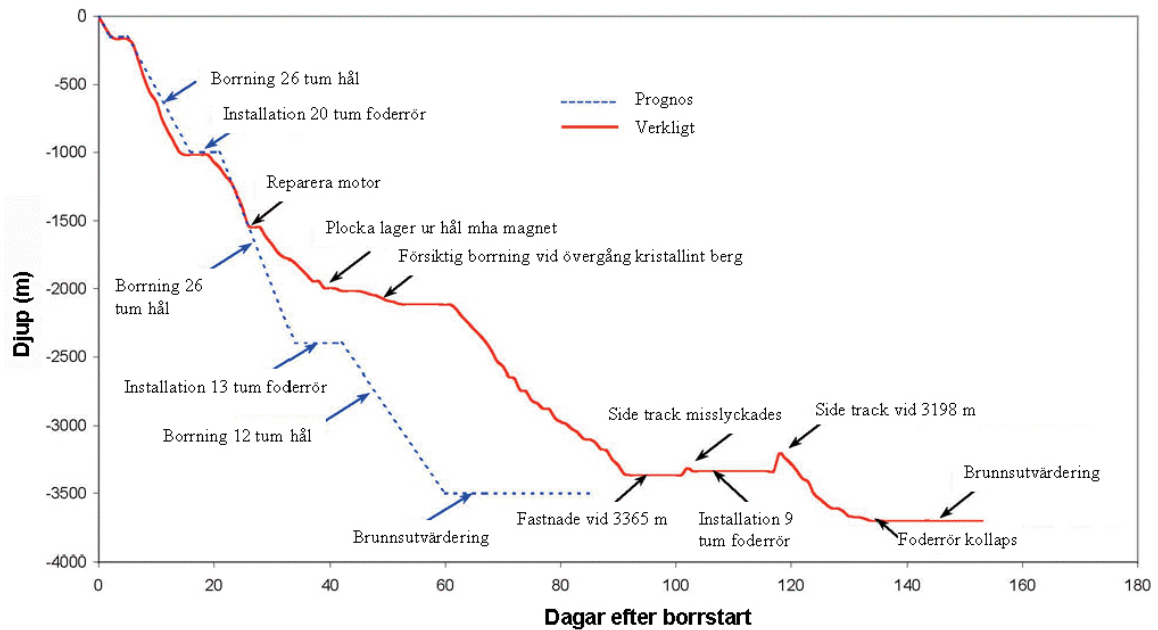


Figur 5-16. Borrhålets avvikelse enligt deviationsmätning – Vertikal profil. Vid ca 3 200 m utfördes en cementering och side track i nytt borrhål. (Bjelm och Rosberg 2006).



Figur 5-17. Borrhålets avvikelse enligt deviationsmätning – horisontell profil. (Bjelm och Rosberg 2006).

Lund DGE#1...tid mot djup



Figur 5-18. Borrningens genomförande med nyckelaktiviteter. (LTH/Lunds Energi 2003).

Erfarenheter

Projektet konstaterar att penetrationshastigheten för metoderna hammare för borrvätska, lufthammare och luftborring är någorlunda likvärdig med kommentaren att hammarborrkronan för borrvätska är 8 ½ tum (216 mm), jämfört med 12 ¼ tum (311 mm) för de andra metoderna. Penetrationshastigheten för dessa metoder var klart högre än för konventionell borring med borrvätska och rullborrkrona. Hammaren för borrvätska var en prototyp och man hade inte några kostnadsuppskattningar för den. Den har också visat sig känslig för igensättning av finkornigt material i hammaren, vilket ställer mycket höga krav på rening av borrvätskan. Vid kontakter 2007 med tillverkaren av hammaren (Wassara) tillkännagav de att de inte kommer att tillverka vätskedrivna hammare för stora djup.

5.2.7 Vetenskaplig borring i Outokumpu 2 516 m

Syfte

Det 2 516 m djupa hål som borrades i Outokumpu är ett rent forskningshål. De vetenskapliga undersökningarna samordnades med reflektionsseismiska mätningar som utförts några år tidigare med målsättningen att öka kunskapen om berggrundens sammansättning och struktur. Vidare önskade man undersöka hydrogeologin och speciellt vattnets salthalt.

Bergarterna i området består huvudsakligen av glimmerskiffer, serpentinit, pegmatit och granit. Borrningen beställdes av GTK (Geologiska Forskningscentralen i Finland) och utfördes av det ryska företaget Nedra som en avbetalning på den ryska statsskulden till Finland.

Borrningen startade 11 april 2004 och nådde 2 516 m den 31 januari 2005.

Borringsteknologi

Borrningen utfördes med roterande borring med borrrör av stål och tyngdborrör. Borrningen gjordes med rullborrkronor som tog 100 mm kärna och med 14 m långt kärnrör.

Hålet bekläddes med 324 mm foderrör ned till 39 m. Därefter har det borrats med 216 mm borrkronor och öppet borrhål hela vägen. Spolningen har varit vatten och vattenbaserad bentonitväska med en blandning av bentonit och torv.

Borrkronorna var rullborrkronor med 6 eller 8 rullar, figur 5-19. Borrkronan byttes när man tog upp och tömde kärnröret efter 10–14 m. Borrören hade 102 mm diameter och vägde 230 kg i 9 m längder. Tyngdborrören (Drillcollars) med diametern 178 mm vägde 1 250 kg i 8,5 m längder.

Borrigen hade 48 m tornhöjd och 200 tons lyftkapacitet och var byggd 1988.

Erfarenheter

Hålet har i stort varit stabilt, även om man fick vidta vissa åtgärder ned till 500 m. Som mest avvek borrhålet 9 grader. Borrningen skedde kontinuerligt dygnet om och det tog 290 dagar att nå 2 516 m. Kärnutvinningen var 90 %. Bergspänningarna ökade kraftigt under 2 000 m och orsakade att kärnorna skivades i diskar. Ett exempel på ”core discing” visas i figur 5-20.

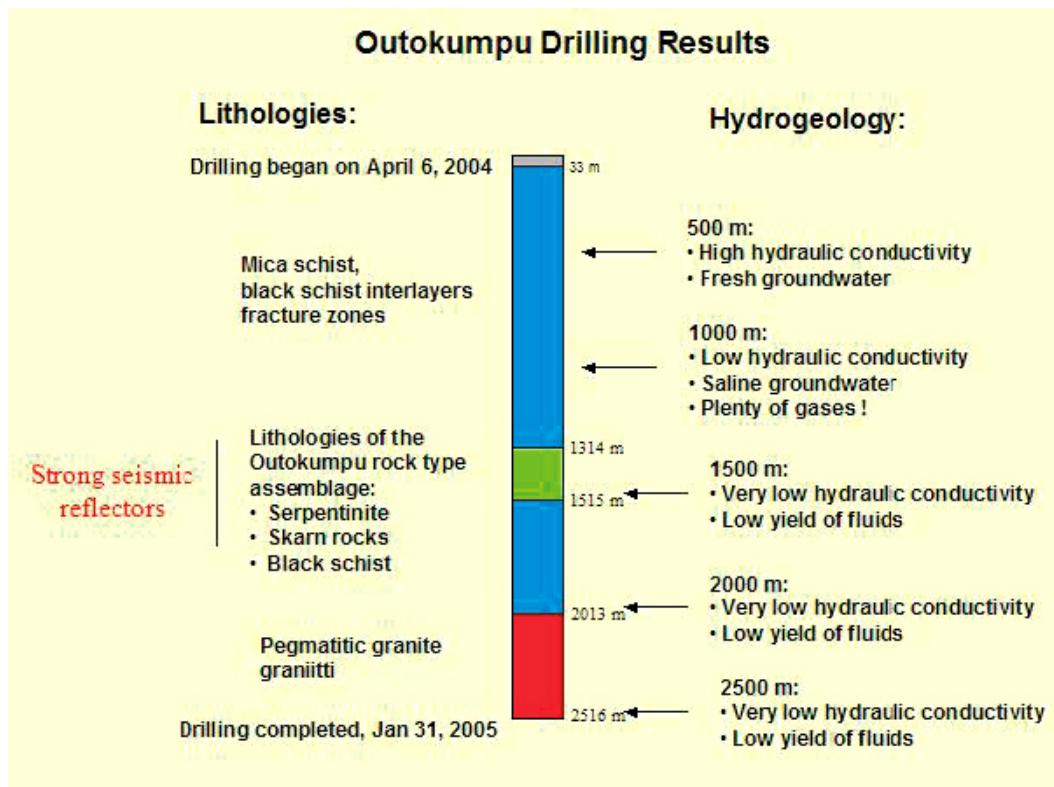
Borresultat, se figur 5-21 nedan.



Figur 5-19. Rullborrkrona för kärnbörning.



Figur 5-20. ”Core discing”, där borrkärnan skivas upp som i figuren, är ett tecken på höga bergspänningar.



Figur 5-21. Översiktligt schema med litologi och hydrologi. (Geological Survey of Finland 2007).

5.2.8 Erfarenheter från referensprojekten

Referensprojekten visar att det är möjligt att borra 5 000 m djupa hål i kristallint berg. Samtliga referensprojekt är i huvudsak borrhåll med rullborrkronor och borrhälskyl (oftast vatten, ibland dieselolja) med tillsatser såsom bentonit och polymerer. Inget av hålen har den diameter Sandia förespråkar (445 mm) på tänkt försvarsdjup (3 000–5 000 m) (Arnold et al. 2011) och Brady et al. 2009). Det hål som ligger närmast är KTB HB, som har en diameter av 375 mm ned till 6 000 m djup.

Det har varit svårt att borra raka hål. I de flesta hålen var man tvungen att utföra ”sidetracks” på grund av borrhållsproblem. Undantaget är KTB HB som borrhålades till 7 000 m djup utan sidetrack. Hålet kunde dessutom borrhål rakt ($\pm 0,5$ grad) och vertikalt tack vare den aktiva vertikalkontrollsystemet, VDS-4. Under 7 200 m gick det däremot inte att använda VDS-4 då kraftiga utfall (breakouts) gjorde hålet så oavlat och stort att VDS-4 inte fick fäste.

Problem med spjälkning och utfall är störst under själva borrhållningen. Då borrhålet blivit infodrat blir det normalt stabilt.

5.3 Andra intressanta projekt

5.3.1 Schakt

Gränsdragningen mellan borrhållning av borrhål och anläggande av vertikala schakt är inte klart definierad avseende dimensioner och djup, utan avgörs snarare av vilken bransch man kommer ifrån. De två utförandetyperna för schakt är borrhållning, så kallad ”blind shaft drilling”, med någon meter i diameter, och de som utförs med borrhållning och sprängning till stor diameter.

Inom blind shaft drilling så borrhål schakt upp till ca 6 m i diameter men inte till större djup. Djup större än 1 000 m tycks vara mycket ovanligt. Ett exempel på ett mycket djupt schakt utfördes i Amchitka i Alaska av US Department of Defence med 2 m diameter till 1 906 m djup i bergarten andesit (O’Brien et al. 1979). Vidare så har hela utvecklingen av blind shaft drilling i USA skett i samband med underjordssprängningarna med kärnvapen som inleddes 1962 i Nevada (Rowe 1993).



Figur 5-22. Borrkrona för schaktborrning (blind shaft drilling) med diameter 5,5 m till 100 m för ventilation. (Shaft drillers 2007).

I framtiden bedömer (Maloney och Zeni 2003) att man kan utföra 8 m vida schakt till 1 000 m. Här bör då finnas en potential att utveckla metoder att borra ner till större djup med mindre diameter om det finns incitament. Blind shaft drilling utförs till största delen i mjuka sedimentära bergarter.

Schaktsänkning med stora diametrar med borring och sprängning kan utföras till mycket stora djup. Exempelvis är South Deep shaft i Sydafrika cirka 3 000 m djupt och 9 m brett.

Tillvägagångssättet för South Deeps schakt är följande:

”För-schaktet” är 22 m djupt med en glidformsgjuten överbyggnad i betong på 104 m. Eftersom det ofta är dåliga markförhållanden i denna övre del, så krävs det kraftig förstärkning med armerad betong längs periferin. Överbyggnaden har bland annat ett wire-spel för transporter i schaktet, som tar upp till 130 ton och har en transporthastighet på 15 m/s (Kirkbride och Stringer 2002).

Huvudschaktet byggdes med borring och sprängning med hjälp av en multi-bom borr-jumbo. Förstärkning med bultar och temporär förstärkning utfördes på bottennivån medan inklädnad med betong utfördes på en nivå ovanför botten.

Det har inte framkommit från någon dokumentation eller vid samtal att schakt har utförts någonstans med de diskuterade dimensionerna för konceptet djupa borrhål till 4–5 km djup.

5.3.2 Borrning i USA och Sovjetunionen/Ryssland för deponering av radioaktivt material samt för militära ändamål

Innan USA upphörde med kärnvapensprängningar under jord 1992, hade mer än 800 tester genomförts i Nevada Test Site (NTS). Flertalet av dessa genomfördes i vertikala schakt med diameter 0,9–3,7 m och djupen 183–1 500 m. Två borrhål som bör noteras, och som utfördes av US Department of Defence i Amchitka i Alaska är dels 2,0 m diameter och 1 906 m djupt och dels 3,0 m diameter och 1 524 m djupt.

Det ryska bolaget FGUP NPC Nedra som borrhål världens djupaste borrhål på Kolahalvön, samt borrhålet i Outokumpu i Finland (se avsnitten 5.2.1 respektive 5.2.7 i denna rapport), har sedan 1980-talet arbetat med ett koncept för deponering av högaktivt radioaktivt avfall som innehåller långlivade radionuklider. Materialet är tänkt att deponeras i djupa borrhål med diameter 480–1 020 mm på 4–6 km djup och skyddas av naturliga geologiska barriärer.

Under Sovjetunionens kärnvapenprogram utfördes underjordssprängningar i djupa borrhål. Sprängningar utfördes i platt terräng i borrhål med 900 mm diameter som var borrhål till 200–2 000 m djup (Adushkin och Leith 2001). I figur 5-23 ses en borrhål för borring av denna typ av borrhål.



Figure 29. Drill rig, of the type used for drilling the nuclear test emplacement borehole. Normally, the emplacement borehole has a diameter of ~900 millimeters, and was drilled to depths ranging from 200 to about 1000 meters. The rig shown was that used to drill the hole for the Soviet nuclear test of the US-USSR Joint Verification Experiment, conducted at the Balapan test site in 1988.

Figur 5-23. Borrrigg för borrning av borrhål för underjordiska kärnvapensprängningar. (Adushkin och Leith 2001).

5.4 Borrteknik

5.4.1 Borrmeter

För borrning till stora djup med stor diameter i hårt berg så finns det flera tänkbara metoder. En redovisning av metoderna med deras för och nackdelar presenteras i Sperber (2007).

Borrmeter kan grovt delas in i följande:

- Rotationsborrning.
- Kärnborrning.
- Hammarborrning.

Kärnborrningen är begränsad till små dimensioner och är därför mest lämpad för pilothålsborrning d v s inte för de stora diametrar på borrhål som krävs för konceptet djupa borrhål. För och nackdelar med bland annat denna teknik redovisas nedan.

Rotationsborrning liksom hammarborrning är lämpad för borrning av borrhål med större diameter. I allmänhet är hammarborrning effektiv för borrning i kristallint hårt berg på grund av den höga borsjunkningen som kan åstadkommas. En svaghet är att verktyg för hammarborrning normalt nyttjar luft, alltså inte borrhväska som används vid rotationsborrning.

Sammantaget framstår rotationsborrning som, den mest sannolika tekniken att använda för att borra de djupa stora borrhål som krävs.

Rotationstekniken kan delas in i följande tre alternativ:

- Konventionell rotationsborrning (rotation där borrarsträngen roteras från markytan), med direktspolning av borrarväska (ner genom borrarsträngen, upp via annulus, dvs utrymmet mellan berget och borrarsträngen).
- Rotationsborrning (rotation där borrarsträngen roteras från markytan), med omvänd spolning av borrarväska genom att tryckluft tillsätts ytligt i borrarsträngen (borrvätskan cirkuleras ner genom annulus och upp genom borrarsträngen).

Av de tre teknikerna är det första huvudalternativet och det mest använda. Andra alternativet kan bli aktuellt om man skall använda diamantborrkronor och vid styrd borring. Det tredje alternativet lämpar sig vid mycket stora diametrar, t.ex. i övre delen av hålet, men är mindre sannolik i nedre delen av hålet nu när 445 mm bottendiameter bedöms vara tillräckligt för slutförvaring.

För- och nackdelar med de olika teknikerna

Hammarborrning med luft

Fördel: hög borrsjunkning,
god vertikalitet (pga låg vikt på borrarsträngen),
lämplig för stor diameter,
lämplig för områden där man har problem att behålla borrarväska.

Nackdel: begränsade djup pga tillgänglig luftvolym och -tryck,
problem om vatten tränger in i borrhålet,
stabilitetsproblem pga lägre tryck än hydrostatiskt,
hög energiförbrukning vid större djup. Jmf djupa borrhål i Lund med förbrukning av 10 m³ diesel/dygn för att driva kompressorer.

Hammarborrning med borrarväska/vatten

Fördel: hög borrsjunkning,
god vertikalitet (pga låg vikt på borrarsträngen).

Nackdel: diameterbegränsning (enbart tillgänglig i mindre storlekar),
problem i områden där man har svårt att behålla borrarväska,
hammarproblem om borrarväska innehåller partiklar (igensättning).

Kärnborrning med wire-line

Fördel: hela den borrarde sekvensen dokumenteras med kärna,
hyfsad borrsjunkning.

Nackdel: diameterbegränsning (enbart tillgänglig i mindre storlekar),
problem i områden där man har svårt att behålla borrarväska,
problem att hålla vertikalitet i förstorade borrhål (pga låg böjhållfasthet, vid liten diameter).

Konventionell rotationsborrning (direktspolning)

Fördel: hyfsad borrsjunkning i kristallint berg,
lämplig för stor diameter,
hyfsad vertikalitet (pga böjstyv borrarsträng).

Nackdel: mycket höga cirkulationsflöden av borrarväska nödvändigt (kaxtransp.).
i stora borrhål,
mycket hög energiförbrukning,
problem i områden där man har svårt att behålla borrarväska.

Rotationsborrning med motor vid borrhönan (direktspolning)

- Fördel: hyfsad borrhöknung i kristallint berg,
lämpad för stor diameter,
hyfsad vertikalitet (pga böjstyv borrhösträng),
minskad förslitning av borrhösträngen pga liten rotation av borrhösträngen.
- Nackdel: mycket höga cirkulationsflöden av borrhövätska nödvändigt (kaxtransp.),
i stora borrhö och för att driva motorn,
mycket hög energiförbrukning,
problem i områden där man har svårt att behålla borrhövätskan.

Rotationsborrning (omvänd spolning mha tryckluft)

- Fördel: hyfsad borrhöknung i kristallint berg,
lämpad för stor och mycket stor diameter,
hyfsad vertikalitet (pga böjstyv borrhösträng),
endast låg pumpkapacitet behövs eftersom transport upp gnm borrhösträng,
låg energiförbrukning,
endast mindre problem i områden där man har svårt att behålla,
borrhövätskan.
- Nackdel: reducerad borrhöknung i förhållande till direktspolning pga avsaknad,
av spoltryck mot berget,
ingen motor vid borrhönan är möjlig vid omvänd spolning.

5.4.2 Styrning

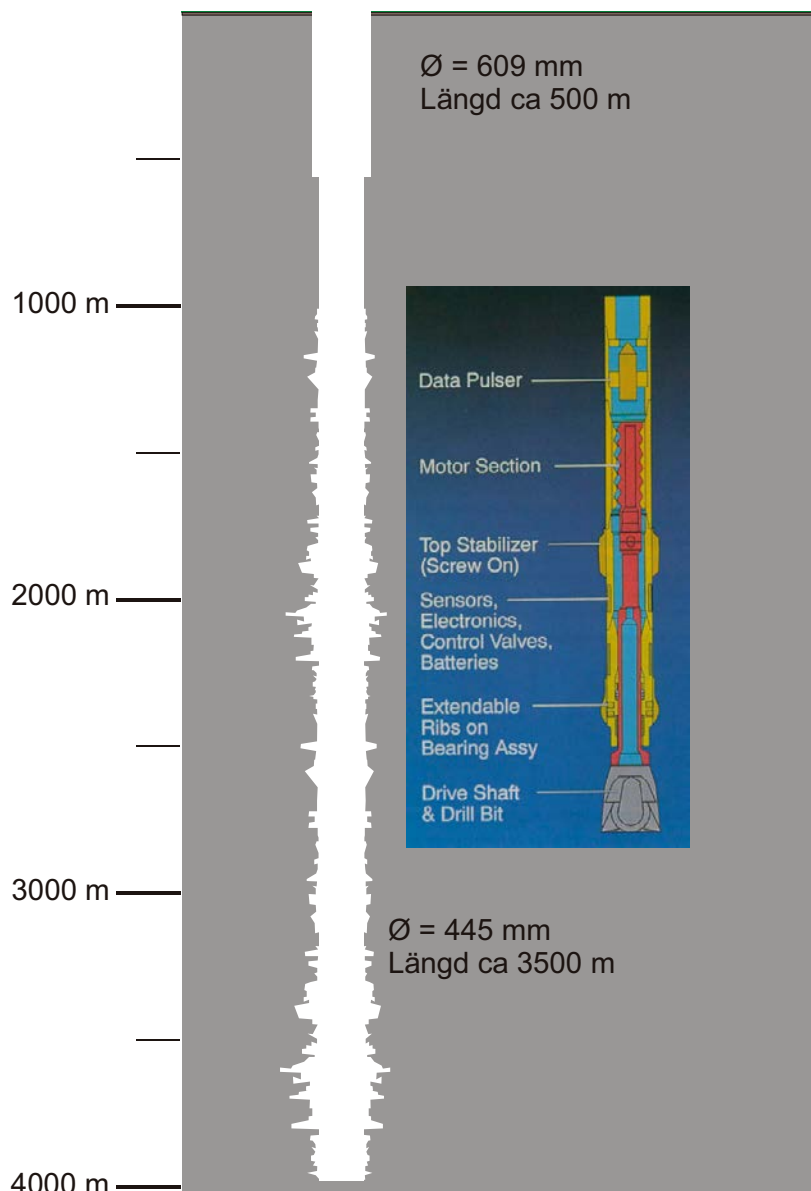
Det finns idag borrhöknungstekniker för att aktivt styra ett borrhö på ett mycket sofistikerat sätt. Främst har den tekniken utvecklats offshore inom olje- och gasindustrin, där man till allra största delen borrar i sedimentära formationer. Man kan t ex idag följa tunna horisontella olje- eller gasproducerande lager på något tiotal meter i flera km. Den inom olje- och gasindustrin utvecklade tekniken kan även användas för hårt berg, men är inte fullt ut anpassad för detta.

Den utveckling av borrhöknung i hårt berg som man gjorde i KTB-projektet för att hålla borrhölet vertikalt visade sig fungera mycket bra så länge borrhölet behöll sin ursprungliga diameter. Styrutrustningen placeras direkt ovanför borrhönan, se figur 5-24.

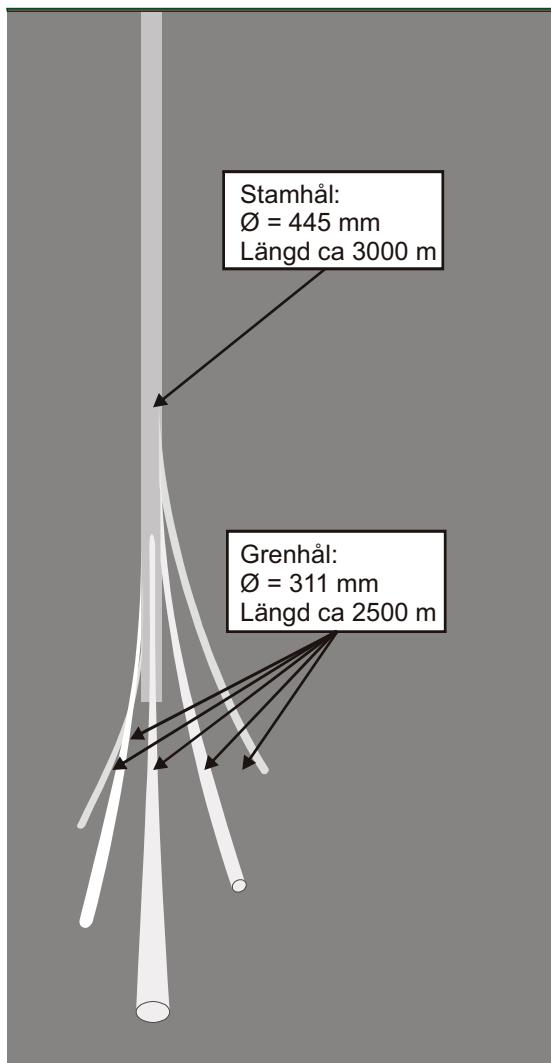
5.4.3 Grenade borrhö

Grenade borrhö används mycket inom oljeborrhöknung framför allt i Nordsjön. Orsaken är att de oljeförande formationerna är plana och tunna och man vill få borrhölet att ha långa skärningar genom de oljeförande lagren. Tekniken att grena och styra borrhölet har förbättrats väsentligt sedan mitten av 90-talet. Varje etablering off-shore är mycket dyrbar och man är beredd att betala för att få flera borrhö och skärningar från en etablering. Greningen sker i oftast i dimension 8½ tum (216 mm) eller 6½ tum (165 mm) i relativt lösa formationer. Det är lätt att utföra grening i lösa formationer men i granit är det svårt att få tillräckligt tryck på borrhönan när man skall ut åt sidan, se figur 5-25.

För att göra avvikelsen ur borrhölet skall stamhålet ha foderrör och avvikelsen sker med ett steg mindre dimension än stamhålet genom ett fönster i foderrör. Detta gäller framför allt om flera greningar skall ske från samma stamhöl. Ju hårdare berg desto svårare att grena ut p.g.a. att det är svårare att få avverkning i sidled när berget kräver högre vikt på borrhönan. På samma sätt är det svårare ju styvare borrhösträngen är desto ju grövre dimension. Det går att grena ut med 12¼ tum (311 mm) borrhöna i granit, men det är tveksamt att göra det med mycket grövre dimension. Vid sedimentära bergarter är fönstret i foderrör 50 m långt, och vid hårdare kristallina bergarter 100 m långt. Djupet för de grenade borrhölet är i intervallet 1 800–4 000 m.



Figur 5-24. Utrustning för att aktivt styra borrhningen och därigenom borra rakt, så kallad "vertical drilling system". (Sperber 1994).



Figur 5-25. Exempel på grenat borrhål.

Att grena eller göra en ”kick off” från stamhålet görs med ett styrsystem med rörliga ribbor som pressas mot borrhållsväggen och borrhållsmotor som roterar borrhållskronan med hög effekt t ex TruTrak och AutoTrak från Baker Inteq. Utrustningen används sedan för att få rätt riktning på ”grenen” efter den har lämnat stammen. Dessa system är dyra att använda.

Som ett djupt borrhål för förvaring av kapslar på stort djup bör grenade borrhål undvikas av följande skäl:

- Det går inte att borra grova ”grenar” i hårt berg som granit. Detta resulterar i smala deponeringshål.
- Borrningen medför förhöjt slitage på borrhållstrustningen.
- Viss loggutrustning kan även vara svår att få ned i borrhålet om hålet avviker för mycket från vertikplanet.
- Övergången mellan stamhål och ”gren” har inget foderrör.
- Metoden att gå upp och ned i rätt gren är inte säker, särskilt med flera grenar och många kapslar.
- Risken att en kapsel skall fastna är mångfalt större.
- Dyrare borrhållsmetod.

5.4.4 Borrkronor

Som referenser för var rullborrkronor för hårt berg används kan nämnas följande:

På Island borrades geotermiska borrhål i basalt med 17 ½ tum (445 mm) i övre delen av borrhålet och slutdiametern 12 ¼ tum (311 mm). I Vietnam och på Färöarna borrades det i granit och dit hade Christensen levererat rullborrkronor. I Vietnam användes 12 ¼ tum (311 mm) och 8 ½ tum (216 mm) borrkronor.

Den största rullborrkrona (tri-cone bit) man tillverkat hos Christensen var 31 ½ tum (800 mm) och den var avsedd för mjukare formationer. De största standardborrkronorna för hårda bergarter är 17 ½ tum (445 mm).

Rullborrkronor för hårda bergarter kräver högre matningskrafter, upp till 50 ton för en 17 ½ tum (445 mm) borrkrona i hård granit. Kronorna för hårt berg kännetecknades av tätare och mindre exponerade hårdmetallstift, kraftigare lager med individuell trycksmörjning samt diamantsatta yttersidor. En 700–800 mm borrkrona skulle kräva 75–80 ton i hårt berg, vilket är svårt att applicera i början av borrhålet.

5.5 Ny borrhsteknik

5.5.1 Herrenknecht Vertical GmbH

Det tyska företaget Herrenknecht är ett välkänt företag i tunnelbyggarsammanhang och företaget är idag världsledande inom TBM-teknik. Man har sett ett växande intresse för geotermisk borrhning och ville därför applicera sitt kunnande på borrhningar. Eftersom borrhbranschen är konservativ finns potential att förbättra och förnya utrustning och handhavande. Man bildade därför bolaget Herrenknecht Vertical år 2005, med fokus att utveckla och bygga borrhningar med god arbetsmiljö, god säkerhet och som uppfyller höga miljökrav. Borrhningarna kallas Terra Invader (TI). De finns idag i 3 storlekar: TI 250, TI350 och TI450 där siffran anger lyftkapaciteten i ton på borrhuvudet. För den största riggen, TI450, anges djupkapaciteten till 6 000 m. TI riggarna har alla API licenser och är 100 % hydrauliska. Tryck och drag sker med stor noggrannhet och kontroll.

Borrhningarna har inga kablar eller wirespel som de flesta riggar har idag, utan allt är hydrauliskt vilket innebär en ökad säkerhet såväl som reduktion av buller. Lite övrig information om riggarna:

- Rigg med tillbehör är kompakt och hopbyggd av stapelbara moduler vilket innebär att borrhplatsen endast behöver vara 30×80 m alternativt 40×60 m.
- Borrroren ligger på röställningar i stället för att stå vertikalt invid borrhålet, vilket är en fördel vid stora djup (då många borrhror behövs) och vid kraftig vind.
- Rör (till exempel borrhör eller foderrör) i storlekarna 2 7/8 till 24 ½ tum (73–622 mm) och vikter upp till 5 ton kan hanteras av kranen.
- Låg ljudnivå.
- Hög säkerhet och lite personal. Endast 2 man krävs för att köra ”trips in and out”. Lättare att lära yngre borrhare och ingenjörer köra maskinen.
- Hastighet ur eller i borrhål är upp till 620 m/tim. Det vill säga att gå ner till 5 000 m och upp igen tar minst 16 tim i ren transporttid.



Figur 5-26. Herrenknecht Terra Invader.



Figur 5-27. Kranen som lyfter de horisontellt liggande rören och skarvar dem till vertikala borrhsträngen.

Under åren 2009–2011 har tre olika kontraktörer med TI350 borrar åtta geotermiska borrhål i Tyskland med håldjup mellan 3 900 och 5 100 m enligt nedan:

Plats	Djup	Tid	Kontraktör
Kirchweidach 1*	4 937 m	108 d	H. Anger's Söhne
" 2*	5 133 m		"
Maurerstetten	4 545 m		Hekla Energy GmbH
Durrnhaar 1	4 393 m		H. Anger's Söhne
" 2	4 530 m		"
Kirchstockach 1	4 214 m	101 d	Hochtief Construction AG
" 2	4 452 m	81 d	"
Hanover	3 902 m		H. Anger's Söhne

* Startdiameter 711 mm, bottendiameter 241 mm.

Övriga borrhål: Startdiameter 584 mm och bottendiameter 216 mm.

Hålen ovan har mindre diameter än vad som krävs för deponering och är borrade i sedimentära formationer, men är de hål som mest liknar deponeringshålen.

Vid SKB:s besök hos Herrenknecht Vertical år 2013 framkom att geotermimarknaden inte alls har utvecklats som beräknat. I stället för prognostiserade 400 borrhål på 2–3 år har det endast blivit 50 borrhål på 7 år. Detta på grund av att geotermi fått dåligt rykte i Tyskland då mindre nogräknade borrhållämpligheter orsakat sättningar i samband med borrhållämpligheter.

Herrenknecht Verticals tekniske chef Jürgen Binder (Binder J 2013, personal communication) bedömde att hålen för deponering så som de föreslagits av Sandia (Arnold et al. 2011, Brady et al. 2009) skulle vara möjliga att borra i hårt berg såsom granit, även om det ger ökat slitage på utrustningen. Det skulle antagligen krävas en maskin med en kapacitet på 750 ton, vilken enligt Herrenknecht Vertical är möjlig att konstruera och bygga.

Jürgen Binder bedömde att ett första deponeringshål skulle ta 150–200 dagar att färdigställa, det vill säga borra, logga och sätta foderrör, men utan deponering och pluggning. När man blir inkörd borde man hinna med att borra 3 hål per maskin och år. Med 100 meter mellan hålen skulle det gå bra att flytta borrhållämpligheten utan att montera ned den, och flera maskiner skulle kunna borra parallellt.

En helhydraulisk maskin av typ Terra Invader skulle, enligt Jürgen Binder, även kunna användas för deponering och pluggning. En maskin skulle då kunna hinna med att färdigställa uppskattningsvis 3 hål på 2 år.

5.5.2 IRIS

IRIS (International Research Institute of Stavanger) utför forskning och utveckling inom olja, marin miljö och gasteknologi, samt genomför affärsutveckling. Institutet har ett nära samarbete med universitetet i Stavanger.

IRIS har en stor oljeborrhållämplighet på land för att utföra borrhållämpligheter. Righeten som heter "Ullrigg" är 70 m hög och den står på räls så att den kan flyttas mellan testhålen. Vid besök år 2007 fanns där 7 testhållämpligheter med djup mellan 400 m och 2 200 m. Kontaktperson var Kjetil Freyland som var projektledare för "Ullrigg". Bergarten under riggen är ferlit ned till 800 m och sedan hård granitisk gnejs. Righeten är eldriven och har rotationsbord, men kunde också förses med motor på toppen av borrhållämpligheten. Att flytta riggen mellan två borrhållämpligheter tog 4 timmar. Righeten kan hyras av utomstående för egna tester.

Borrhållämpligheter för borrhållämpligheter i hårt berg som IRIS använde vid sina borrhållämpligheter hade förbättrats väsentligt de sista 10 åren, nu räcker det med 3–4 borrhållämpligheter ned till 2 000 m. Ett test som hade körts var att gräna borrhållämpligheter i gnejs, vilket var svårare än i Nordsjöns sedimentära formationer.

5.6 Kostnader

I Arnold et al. (2011) finns det en noggrann uppskattning av kostnaderna att färdigställa ett deponeringshål ned till 5 000 m. Det är en färsk uppskattning gjord i de dimensioner som vi idag anser mest sannolika, med en bottendiameter på 445 mm.

Kostnaderna för ett färdigställt hål beräknas till 27,3 MUSD i 2011 års penningvärde, dvs ca 185 miljoner SEK. I dessa kostnader ingår inte kostnader för loggning och kartering och inte heller kostnader för deponering och förslutning.

Axel Sperber har tidigare visat att kostnaderna för att borra ett hål i en viss formation är proportionell mot hålets volym eller tvärsnittsarea.

Enligt Beswick (2008) är det sannolikt att ovanstående kostnader minskar när man borrar flera lika hål i samma område. En minskning med 25% ända till 50% är möjligt vid ett större antal hål. Å andra sidan är borkostnaden i Europa betydligt högre än i USA, lika många £ i Europa som \$ i USA, enligt Beswick (2008).

5.7 Risker/osäkerheter

	Konsekvens	Kommentar
Utfall i borrhålsvägg	Borrkrona/-rör fastnar.	Kan ev lossgöras och borra vidare. Om det inte går måste delen som fastnat separeras från resten och tas ur borrhål. Allvarligt om man inte kan fortsätta borra i samma borrhål utan tvingas göra side track. Tveksamt om side track kan accepteras för konceptet djupa borrhål.
Utfall i borrhålsvägg	Svårt att borra rakt/ vertikalt borrhål.	En kraftig avvikelse kan innebära problem att sätta foderrör och få ner/upp kapslarna utan att skada dem.
Bristande rensning av borrhål (jmf DGE#1 Lund)	Borrkrona/-rör fastnar.	Kan ev lossgöras och borra vidare. Om inte måste delen som fastnat separeras från resten och tas ur borrhål. Allvarligt om man inte kan fortsätta borra i samma borrhål utan tvingas göra side track. Tveksamt om side track kan accepteras för konceptet djupa borrhål.
Bristande rensning av borrhål	Foderrör fastnar under installation.	Kan ev lossgöras genom högtrycks-/renspolning från borrhål eller s k coiled tubing. Ett stabilt och rent borrhål är nödvändigt om installationen ska göras säkert.
Passage av större zoner	Tappar borrhålsvätska så måste tätas.	Konventionellt gjuts zoner igen med betong och borrar därefter igenom. Ev restriktioner att använda konventionella betongblandningar pga höga pH kan medföra behov av utveckling.
Ogynnsamma geologiska strukturer	Kan innebära att borrhålet avviker.	Med styrutrustning kan vertikalt rakt borrhål hållas, men det kräver att styrutrustningen har kontakt med borrhålsväggen (ej förstorat borrhål).

Med tanke på de konsekvenser som utfall kan innebära så bedöms det som den klart största risken med avseende på borrhålsoperationen. Det har också konstaterats att dessa problem ökar med djupet, så ett begränsat största djup kommer att minska denna risk.

5.8 Tillämplighet med avseende på konceptet djupa borrhål

Baserat på erfarenheterna från genomförda borrhåll har nedanstående slutsatser dragits med avseende på konceptet djupa borrhål.

5.8.1 Siljansborrningen och KTB-projektet

De två viktigaste referensprojekten för konceptet djupa borrhål är Siljansborrningen och det tyska KTB-projektet, och båda pekar i samma riktning. Nämligen de goda erfarenheterna som visar på möjligheten att genomföra ett borrhål till stort djup i hårt kristallint berg utan större avvikelser i sidled till ett djup på cirka 5 000 m. Nu bör det sägas att lokala förhållanden med olika bergarter och bergspänningar kommer att påverka utfallet av borrhål på olika sätt, men det kan dock konstateras att man i KTB-hålet hade en mycket ogynnsam anisotropi.

Speciellt kan noteras att KTB, huvudhålet, hade en dimension på 375 mm till 5 900 m djup. Det är dimensioner som skulle kunna räcka för konceptet djupa borrhål.

5.8.2 Lunds djupgeotermi (DGE#1)

De olika borrhållsteknikerna som användes i Lunda-projektet är intressanta att studera vidare för bedömning av vad som kan vara en framgångsrik väg för konceptet djupa borrhål. Med de stora djupen på 5 000 m kan luft vara mindre attraktivt. De goda resultaten avseende borrsjunkning är intressanta men man bör vara vaksam på den effekt som ett lägre borrhållstryck innebär. De bergmekaniska bedömningarna visar på ett ökat utfall vid lägre tryck i borrhålet, och konsekvenserna därav kan bli stora.

Hammare för borrhåll kunde vara ett intressant alternativ, så det är beklagligt att man inte har en fortsatt utveckling av Wassara-tekniken för stora djup. Vid ett samtal med Berndt Wundes (inhyrd konsult av Herrenknecht Vertical) år 2007 så berättade han om en annan hammare för borrhåll av kinesiskt fabrikat, som han använt och var enklare och mindre känslig än Wassara-hammaren.

5.8.3 Oljeindustrin (Norge)

SINTEF (oberoende norsk forskningsorganisation) sade tidigt att de ansåg att bergspänningar skulle bli största problemet vid borrhåll av djupa hål i granit och att man bör borra balanserat med borrhållsvätska (Halsey 2007, Rommetveit 2007). För borrhåll i kristallint berg rekommenderades att borra med ”tricone bit” och hammare (vibrator) och spolning med oljebaserad borrhållsvätska. De största borrhållskronorna som är någorlunda frekventa är 27 tum (686 mm), som skulle kräva mer än 50 ton vikt på borrhållskronan i kristallint berg. Borrhåll i kristallint berg ger ett fint borrhållskax som är svårt att separera ur borrhållsvätskan och som ger stort slitage i hammaren. Borrsjunkningen är typiskt 1 m/timme.

Tekniken att grenade borrhåll fungerar bra och Halsey (2007) ansåg att den kunde vara lämplig för konceptet djupa borrhåll. Stamhålet skulle då göras grövre 24–27 tum (610–686 mm) ned till 1 500–2 000 m för att sedan fortsätta med grenade borrhåll i dimension 12 1/4 tum (311 mm). Halsey framförde vidare att man inte bör fylla med kapslar upp till grenningen utan stoppa 500 m innan.

Halsey förordade borrhåll av klenare borrhåll än 800 mm i hårt kristallint berg. Upp till 17 1/2 tum (445 mm) finns det back up med alla typer av utrustningar som borrhållskronor, styrutrustning, motorer etc. Att borra stamhål på 24 tum (610 mm) vore tänkbart och kanske även att grenade borrhåll i dimension 17 1/2 tum (445 mm) om grenade borrhåll önskas.

6 Deponering

I avsnitt 6.1 redovisas deponering enligt SKB:s ursprungliga förslag från Juhlin och Sandstedt (1989) och från PASS-studien (SKB 1992). I avsnitt 6.2 redovisas ett senare förslag från Brady et al. (2009) och Arnold et al. (2011) från Sandia.

6.1 Metodbeskrivning SKB

Deponeringen av kapslarna ned till botten och verifiering av att de är på plats är den svåraste och mest kritiska delen av metoden med slutförvar av använt kärnbränsle i djupa borrhål. Det säkraste är att ha raka vertikala borrhål som är klädda med foderrör hela vägen i en och samma diameter. Krokiga hål, grenade hål eller hål med varierande diameter ökar risken för att fastna. Den enda deponeringstest i djupa hål SKB känner till skedde 1983 i Nevada Climax-programmet. Då sänktes 11 st kapslar med ytterdiametern 360 mm ned i ett 420 m djupt hål med innerdiametern 480 mm. Varje kapsel innehöll ett PWR bränsleelement. Nedsänkningen skedde med wire och ett wire-line spel från en truck med transportbehållare (cask). Efter 3,5 år winchades kapslarna upp igen genom hålet, oskadade och utan strålningsexponering för personalen.

I flera av de förslag som presenterats senare, bland annat SKB (1992) och Harrison (2000), sätts kapslarna ned en i taget med borrhörsträngen. Fördelen jämfört med Climax-försöket är att man kan trycka och vrida för att lättare få ned kapseln. Svårigheten är att kontrollera djupet så att man inte skadar kapslar som redan deponerats i hålet. Mellan kapslarna förslår bland annat Juhlin och Sandstedt (1989) att man lägger block av pressad bentonit.

I stället för att sätta ned med borrhörsträngen föreslår Beswick (2008) att man sätter ned kapslarna med så kallad coiltubing (CT), som används mycket vid servicearbeten inom oljeborrningen. CT är ett stålrör som är kontinuerligt upplindat på en stor trumma, och som kan sänkas ned och dras upp i borrhålet snabbare och smidigare än borrhören. Diametern på CT-röret kan variera från 60 till 92 mm, och längden kan vara upp till 6 000 m. Att använda CT innebär, jämfört med borrhörsträng, att man har bättre kontroll på läget i borrhålet och kan kommunicera via röret.

6.1.1 Buffert

Med syfte att skapa ett system som förhindrar/minimerar vattenströmning i borrhålet och håller kapslarna på plats föreslås dels att borrhörvätskan byts ut mot en ren bentonitslurry innan deponering och dels att kapslarna separeras med skivor/block av högkompakterad bentonit i samband med deponering, se figur 3-1. Alternativa metoder för att placera bentonitslurryn successivt i botten under deponering av kapslar har diskuterats (Juhlin och Sandstedt 1989).

6.1.2 Kapselplacering

Kapslarna med radioaktivt material kan utformas på olika sätt. Huvudalternativet är en längd av cirka 4,4 m, vilket med ett högkompakterat bentonitblock på 1 m ger en total längd av 5,4 m, och en diameter av 500 mm, för att kunna deponeras i ett borrhål med diametern 800 mm

Kapslarna föreslås placeras i änden på borrhören till aktuellt djup inom intervallet 2 000–4 000 m djup. Ett visst motstånd kan förväntas, beroende på hur tjock/viskös slurryn är, så de kan behöva tryckas eller vibreras ner (Juhlin och Sandstedt 1989). Kapslarna ska vara centrerade i foderrören för att möjliggöra ett eventuellt återtag.

För att lyckas placera kapslarna i rätt position utan överlast så behövs en noggrann mätning av djupläget. Något som poängteras i Juhlin och Sandstedt (1989) och enligt Harrison (2000) kan baseras på konventionell borrhörteknik, där varje borrhör mäts och korrigeras för töjning, en noggrannhet på 10 cm uppnås till 4 000 m djup. Med drygt 400 borrhör, som behövs till fullt djup, innebär det en mycket hög noggrannhet i mätning av varje borrhör. Vidare ska deras längd korrigeras med avseende på

töjning av last och expansion av temperatur. Som exempel kan nämnas att för KTB-hålet, som i och för sig är mer än dubbelt så djupt med 9 101 m, så korrigerades djupläget med 15 m för mekanisk töjning och 28 m för termisk expansion. Det finns emellertid loggar idag som registrerar djupläget av foderrörsskarvarna som referens, så med kompletterande mätningar borde noggrannheten vara relativt god, vilket också är nödvändigt för denna kritiska aktivitet.

6.1.3 Förslutning

Efter att deponeringszonen (2 000–4 000 m) har fyllts med kapslar och mellanliggande skivor/block av högkompakterad bentonit så förslås ett antal av dessa skivor/block av högkompakterad bentonit placeras ovanför. Den huvudsakliga förslutningen mellan ca 2 000 m och 500 m föreslås bestå av högkompakterad bentonit som omges av bentonitslurry. Från 500 m till 250 m föreslås en asfalt-tätning av borrhålet. De övre 250 m av borrhålet gjuts igen med betong.

6.1.4 Återtag

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

6.1.5 Risker/osäkerheter

Händelse	Konsekvens	Kommentar
Kapsel lossnar från borrhör innan aktuellt djupläge har nåtts	Ev kan kapsel skadas vid hög hastighet. Annars får kapseln kopplas igen alt tryckas ner i position.	Ev svårighet veta djupläge kan innebära risk för skada på kapseln om den forceras på plats.
Ej möjligt koppla loss kapsel på avsett djup	Alt måste kapsel tas till markytan eller finns teknik att spränga av rör.	Att ta en kapsel till markytan om det är fel på mekanismen kan innebära riskfyllt strålskyddat arbete. Att spränga av rören innebär risk för kapsel/foderrör i borrhålet.
Förskjutet foderrör	Kapsel riskerar skadas eller är passage förbi skadat foderrör omöjlig.	Borrhålets kondition bör undersökas regelbundet så man vet att kapseln kan passera och att man kan minimera dessa risker.
Ev bergmekaniskt orsakad deformation av foderrör.	Ev svårigheter att deponera/återta kapslar. Skador kan uppstå.	Storleken på skjuvbrott och krypdeformationer har inte kunnat fastläggas, inte heller vilka ev laster som kan genereras. En fråga att reda ut.
Oklart djupläge	Risk för mekanisk skada på kapsel vid deponering.	Noggrann djupmätning är nödvändig.
Sättning i bufferten efter viss tid	Problem med djupläge vid eventuell återtag.	Oklart djupläge ökar risken för skador.

Den största enskilda risken bedöms vara kopplad till deponering och djupmätning, med eventuell konsekvens att skada kapslarna, eller sätta fast dem. Konsekvenserna av skador på kapslarna i samband med deponering kan bli allvarliga, speciellt om de fastnar och det inträffar grundare än deponeringszonen (2 000–4 000 m). Riskerna kan minimeras om förutsättningarna med ett borrhål i gott skick är uppfyllda och befintlig olje- och gasborrningsteknologi kan utnyttjas och utvecklas.

6.2 Metodbeskrivning Sandia

Den metod för deponering som föreslås i Arnold et al. (2011) är mer genomarbetad och bedöms även vara säkrare än SKB:s ovan beskrivna metod, baserad på Juhlin och Sandstedt (1989) och PASS (1992). Kapslarna som är försedda med utvändiga kopplingar skarvas ihop med varandra till en 200 m lång sträng med 40 kapslar som sänks ned i borrhålet med borrhöret. Hopskarvningen av kapselsträngen sker i toppen på borrhålet där kapslarna trycks ned en i taget ur transportbehållaren (cask) och gängas ihop med kapseln närmast under. Den sista kapseln kopplas ihop med borrhöret. I nederänden på kapselsträngen finns en rundad sko och en caliper som mäter och signalerar om det finns något hinder i vägen eller om hålet är för trångt.

6.2.1 Kapselplacering

Deponeringszonen fylls med en bentonitlurry, och kapselsträngen sänks ned med borrhöret. När sedan kapselsträngen har kommit ned till botten så sätter man en mekanisk plugg, en så kallad Bridgeplugg, som täpper till hålet, strax (0,5 m) ovanför sista kapseln. Ovanpå Bridgepluggen gjuter man en 10 m lång betongplugg för nästa kapselsträng att landa på. Förfarandet upprepas 10 gånger till dess att deponeringszonen är fylld med totalt 400 kapslar. Borrhålet är fodrat med foderrör som håller samma innerdiameter 380 mm hela vägen från transportbehållaren till botten på hålet. Innerdiametern kontrolleras med en separat caliper före varje deponering. Den lilla diameterskillnaden mellan innerdiametern på foderröret och ytterdiametern på kapseln gör att deponeringshastigheten blir låg, och nedsänkningen stoppas för att förhindra att kapselsträngen fastnar om mätinstrumentet i nosen signalerar att det finns hinder i vägen. Genom att kapselsträngen är robust och hastigheten är låg så bedöms det vara säkert att sätta ned kapselsträngen på betongpluggen/botten utan att skada någon kapsel.

Ovanstående metod reducerar de problem som tidigare rapporter pekat ut som den största svårigheten, nämligen att mäta läget på kapseln tillräckligt noga för att hamna på rätt djup utan att skada andra kapslar.

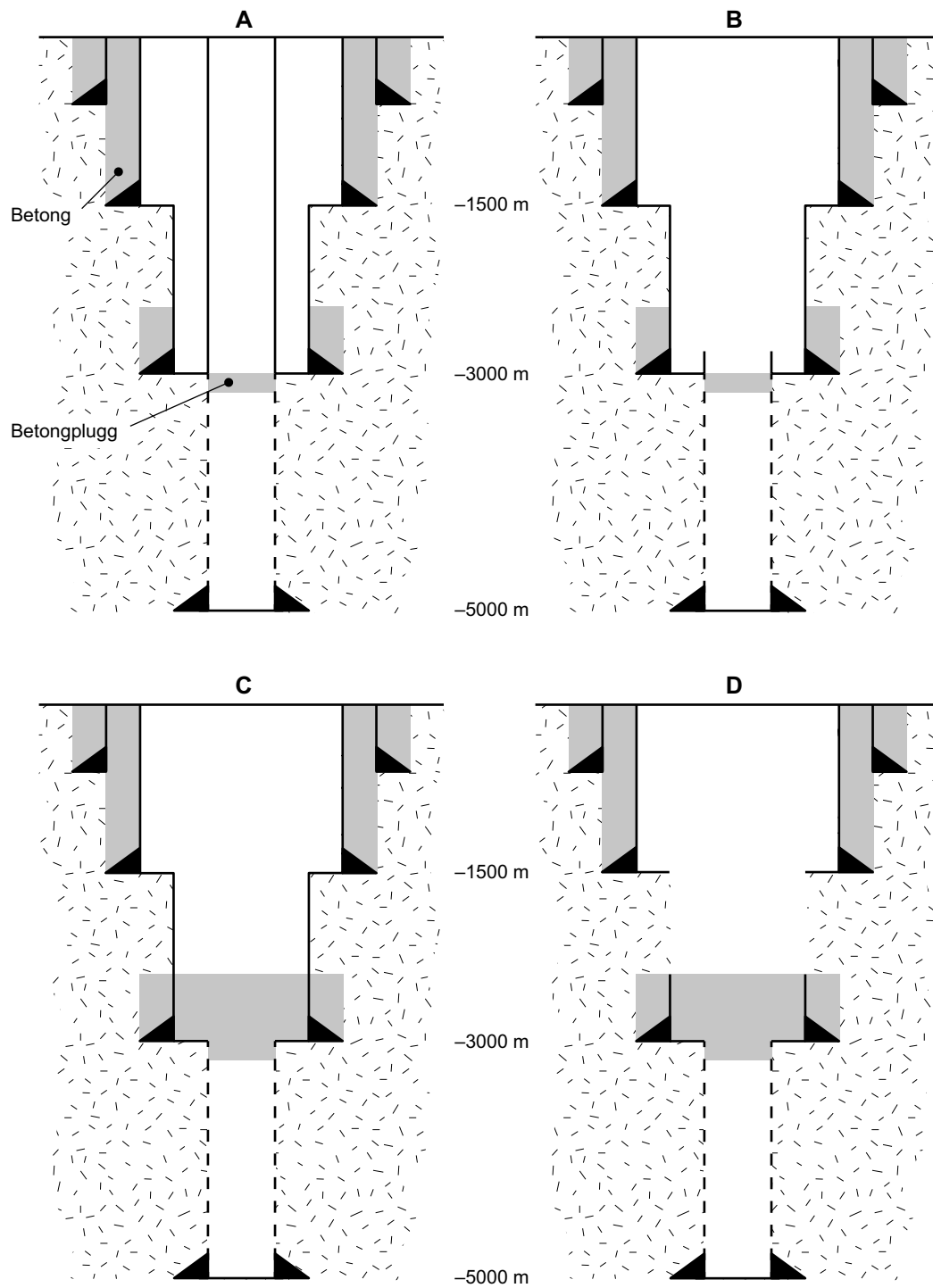
6.2.2 Förslutning

Efter att deponeringszonen (3 000–5 000 m) har fyllts med kapslar och mellanliggande pluggar så avslutar man med att sätta en Bridgeplugg ovanför sista kapselsträngen och gjuta en 10 m betongplugg ovanför, se A i figur 6-1. Därefter drar man upp det inre foderröret (406 mm) ovanför deponeringszonen ur borrhålet, se B i figur 6-1. Det fortsatta arbetet innebär att gå ner med en rörsavskärare och kapa 406 mm foderröret ovanför den övre betongpluggen. Därefter dras rörsavskäraren upp. Den avkapade biten av foderröret tas upp med hjälp av en fångsttapp. Därefter gjuts en betongplugg till ovankanten av 473 mm foderrörets cementerade sektion, se C i figur 6-1. Med hjälp av en rörsavskärare kapas 473 mm foderröret alldeles ovanför cementeringen, varefter rörsavskäraren dras upp. Med hjälp av en fångsttapp tas den kapade delen av 473 mm foderröret upp ur hålet. I detta skede är den ofodrade mittsektionen, från 3 000 m till 1 500 m, frilagd, se D i figur 6-1. Den nedre ofodrade delen mellan 3 000 m och 1 500 m fylls nu med tätningar och pluggar av bentonit, ballast och betong, som varvas, se figur 6-2.

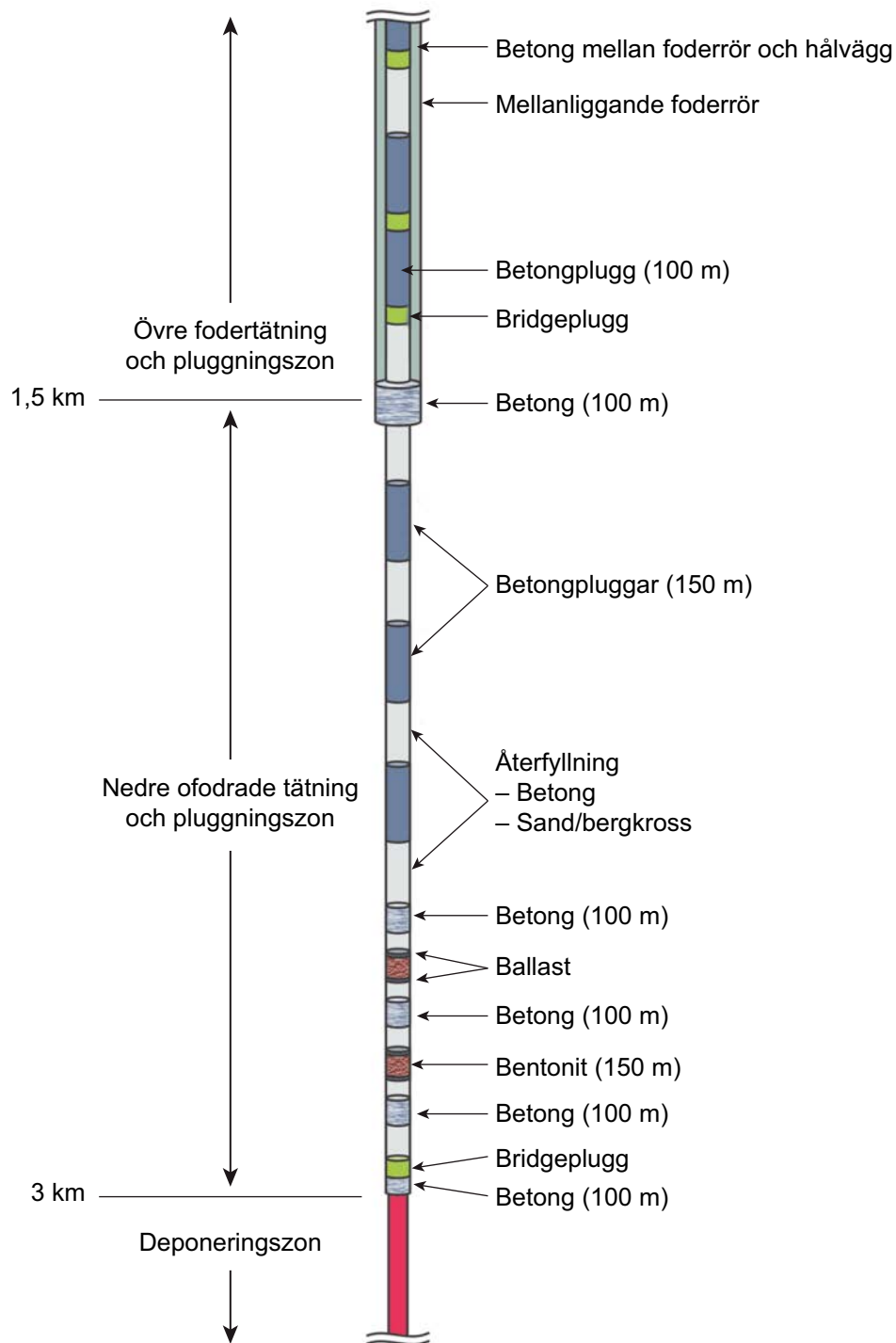
I den övre delen av hålet som fortfarande är klätt med foderrör varvas Bridgepluggar och betongpluggar, samt eventuellt asfalt. Spalten mellan foderrör och hålvägg är sedan tidigare fylld med betong.

6.2.3 Risker/osäkerheter

Nedanstående tabell ges en bedömning av de risker som är förknippade med det deponeringsförfarande som beskrivs av Sandia (Arnold et al. 2011). Detta förfarande är mer utvecklat och bedöms medföra färre risker än SKB:s förfarande som beskrivs i PASS-studien (SKB 1992).



Figur 6-1. Förfarande vid förslutning av borrhål. Baserad på Arnold et al. (2011). Observera att figuren inte är skalenlig.



Figur 6-2. Tätning och pluggning av borrhål. Baserad på Arnold et al. (2011). Observera att figuren inte är skalenlig.

Händelse	Konsekvens / Åtgärd	Kommentar
Kapselsträngen släpper från borrhörens innan kapslarna kommit på plats.	Antingen fortsätter kapselsträngen till hålbotten och stannar där på plats, vilket är OK. Alternativt fastnar den på vägen och får tryckas på plats.	
En ofullständig kapselsträng lossnar innan alla 40 kapslarna är sammankopplade.	Om den ofullständiga strängen går i botten, bör den behandlas som hel sträng och låsas in med Bridgeplugg + betongplugg.	
Ej möjligt att koppla loss kapselsträngen när den är på plats.	Dra upp kapselsträngen till maskin och transportbehållare. Byt ut kopplingen mellan kapselsträng och borrhör, alternativt sätt loss-tagbar koppling mellan 1:a och 2:a borrhöret.	Det alternativa sättet att lossa kopplingen mellan 1:a och 2:a borrhöret ger mindre strålningsrisk.
Kapselsträngen fastnar utanför deponeringszonen och går inte att få loss.	Prova att backa av de kapslar som ligger ovanför den som fastnat och ta upp dem till transportbehållaren. Prova att lyfta foderröret som den sitter fast i för att få kapseln att lossna. Ta upp kapselsträngen med foderröret?	Detta är det värsta scenariot som kan resultera i att man får plugga och tillsluta hålet ovanför den fastnade kapseln. Är kapseln i sektion med rörligt grundvatten kommer det att resultera i radioaktivt läckage om kapseln är trasig eller senast då den har korroderat.
Kapselsträngen fastnar i deponeringszonen utan att vara på plats.	Plugga med Bridgeplugg + betongplugg och fortsätt sedan deponeringen i det utrymme som finns kvar i deponeringszonen.	Minskar kapaciteten i detta borrhål.
Förskjutet foderrör.	Detta bör upptäckas av den caliperlogg som släpps ned innan deponeringen. Prova att reparera. Om det inte går så pluggas och försluts hålet.	Viktigt att kontrollera borrhålet med caliper före varje kapselsträng.
Eventuell bergmekaniskt orsakad deformation av foderrör.	Prova att gå ned med rymmare och öppna upp hålet. Annars se ovan.	Viktigt att kontrollera borrhålet med caliper före varje deponering och även utnyttja den caliper som finns i nederänden av kapselsträngen, så att man undviker att fastna.

7 Slutsatser

Konceptet djupa borrhål innebär att kapslar med använt kärnbränsle deponeras mellan 3 000 m och hålbotten i 5 000 m djupa borrhål i kristallint berg (granit).

Denna rapport har utgått från förslag som framförts under de senaste 30 åren i främst USA, Sverige och Storbritannien, men framför allt i rapporter från Sandia National Laboratories år 2009 och 2011 (Brady et al. 2009, Arnold et al. 2011).

Slutsatser som kan dras ur dessa studier är att:

- Hålen skall vara vertikala och raka för att det skall gå lätt att få ned foderrör och senare att få ned kapselsträngarna. Hålen måste kläs med foderrör för att deponering ska kunna ske med rimlig tillförlitlighet.
- Grenade hål eller ”sidetracks” bör undvikas, då dessa försvårar deponeringen av kapselsträngarna.
- Hålen borras med styrd borrhållning som ger max avvikelse på 0,5 grad.

Genom en relativt bred genomgång av borrhållningen från olika projektbeskrivningar, artiklar och många kontakter inom branschen så har underlag samlats in för bedömning av status för borrhållning med potential att borra ned till 5 km djup i dimensioner som möjliggör deponering av använt kärnbränsle. Kombinationen att borra både djupt och med stor diameter i kristallint berg är mindre vanlig och har främst förekommit i olika forskningsprojekt. Genom det ökade intresset för geotermisk energi utvecklas tillämpningen, och det finns idag utrustning för att borra ned till 5 km med en håldiameter på 445 mm i kristallint berg med max 0,5 graders avvikelse. Detta förutsätter att hålen borras med aktiv vertikalstyrning såsom KTB HB hålet.

Bergmekaniken är central för att bedöma möjligheterna att utföra borrhålen enligt de krav som kommer att ställas. De bergmekaniska effekterna bedöms i första hand skapa problem i samband med borrhållningen genom att utfall och stora deformationer kan orsaka fastborrning och borrhållningsavvikelse. Det har visat sig från flertalet referensprojekt till stora djup, att bergmekaniska fenomen kan orsaka stora problem med vertikalitet och rakhet. Som en följd av detta har man ibland som enda möjlighet gjort ett nytt parallellt borrhål, ett så kallat ”sidetrack”. Hittills har så gott som samtliga hål till 5 000 m borras med side-track, vilket bedöms olämpligt för konceptet djupa borrhål. Referensprojekten har dock i många fall flera år på nacken. Genom att använda i dag tillgänglig teknik bedöms de bergmekaniska effekterna bli mindre, och möjligheten bättre att genom styrning kunna borra vertikala och raka hål. Det bör dock noteras att erfarenhet av att borra 5 km djupa hål i kristallint berg är mycket begränsad. De tekniska problemen är betydande och man får räkna med att en väsentlig andel av borrhålen inte skulle kunna utnyttjas för deponering, åtminstone inte inledningsvis. Något som är av stor ekonomisk betydelse.

Vad gäller deponeringen föreslår bland annat Arnold et al. (2011) att:

- Hålen beklädes med foderrör så att det vid deponeringen är samma innerdiameter i hela hålet.
- Om det inte går att rensa hålet så att foderrören kan sättas ned måste hålet kasseras.
- När deponeringen är klar tas foderrören bort i nedre tillslutningszonen så att pluggar och tillslutning fäster direkt i berget.

Med den i Arnold et al. (2011) föreslagna deponeringstekniken kan det eventuellt gå att genomföra själva deponeringen till 5 000 m djup. Tidigare fanns farhågor för att djupmätningen skulle bli ett svårt problem när kapslarna deponerades en och en, och efterföljande kapsel riskerade att skada redan deponerad kapsel i hålet. Med den teknik som beskrivs i Arnold et al. (2011) sammankopplas 40 stycken kapslar som deponeras med kontrollerad hastighet och utan risk att kollidera med tidigare deponerade kapslar.

Med tanke på själva genomförandet, borrhållning och deponering, och de långtgående kraven på kärnteknisk säkerhet och strålskydd bedöms en akilleshäl vara risken att fastna med kapselsträngen eller delar av den ovanför deponeringszonen utan att få loss den. Risken att detta skall ske bedöms dock vara väsentligt lägre med förfarandet beskrivet i Arnold et al. (2011) än med tidigare studerade

tänkbara deponeringsförfaranden. Detta eftersom diametern reducerats och kapslarna sätts ned i tåg med 40 kapslar som inte riskerar att skada redan deponerade kapslar. Även om borrhningen och deponeringen skulle lyckas återstår dock fortfarande att verifiera att borrhålen med de deponerade kapslarna uppfyller de initiala kraven samt är långsiktigt säkra, något som ligger utanför detta uppdrag.

Liten ordlista

Annulus (eng.)	Spalt mellan borrhålsvägg och foderrör.
Bit (eng.)	Borrkrona.
Blind Shaft Drilling (eng.)	Vertikal borrhning med mycket stora borkronor som innehåller flera kuttrar.
Borehole breakouts (eng.)	Utfall av berg i borrhål p g a instabilitet, ofta vid höga bergspänningar.
Borrkax	Bortborrat material.
Borrsträng	Sammankopplade borrhör och bottom hole assembly.
Borrvätska	Vätska med olika tillsatser som cirkulerar från markytan, ner i borrhålet och tillbaka till markytan för att effektivt få upp borkkax, minska friktionen i borrhålet, kyla/smörja borkkronan, stabilisera/täta borrhålsväggen.
Bottom hole assembly (eng.)	Nedersta delen av borrhsträngen med tunga borrhör, stabilisatorer, mm. Även BHA.
Calliper log (eng.)	Borrhålssond för mätning av borrhålets diameter. Finns med en till flera armar som registrerar diameterförändring med djupet.
Devation	Avvikelse, lutning.
Hot Dry Rock (eng.)	Geotermisk energi som utvinns ur hårt berg utan porositet i själva bergarten. Värmen tas ut genom att vatten cirkuleras i en naturligt sprucken bergmassa eller ett skapat spricksystem (genom hydraulisk spräckning).
Loggning	Mätning i borrhål med olika typer av sonder.
Logging while drilling (eng.)	Loggning under borrhning. Även LWD.
Measurement while drilling (eng.)	Mätning av diverse borrhparametrar under borrhning för att möjliggöra direkta justeringar. Även MWD.
Rate of penetration (eng.)	Borrsjunkning. Även ROP.
Spolvätska	Se ”borrvätska”.
Weight on bit (eng.)	Tyngd på borkkronan vid borrhning. Även WOB.

Referenser

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

Adushkin V V, Leith W, 2001. The containment of Soviet underground nuclear explosions. Open File Report 01-312, U.S. Department of the Interior Geological Survey.

Amadei B, Curran J H, 1982. Creep behaviour of rock joints. I: Underground rock engineering: 13th Canadian Rock Mechanics Symposium. Transactions of the Canadian Institute of Mining and Metallurgy 22, 146–150.

Andersson C, 2007. Äspö Hard Rock Laboratory. Äspö Pillar Stability Experiment, Final report. Rock mass response to coupled mechanical thermal loading. SKB TR-07-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.

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

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

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

Bjelm L, 2007. Deponering av kärnavfall i djupa borrhål! Sammanställd på uppdrag av KASAM, med underlag från Utfrågningen i Stockholm 14–15 mars 2007. Teknisk geologi, Lunds universitet.

Bjelm L, Rosberg J-E, 2006. Recent geothermal exploration for deep seated sources in Sweden. I Geothermal resources-securing our energy future: proceedings of the GRC Annual Meeting, San Diego, California, 10–13 September 2006. (Geothermal Resources Council Transactions 30), 655–658.

Bowden R K, Curran J H, 1984. Time-dependent behaviour of joints in shale. I Proceedings of the 25th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), Evanston, Illinois, 25–27 June 1984, 320–327.

Brady P V, Arnold B W, Freeze G A, Swift P N, Bauer S J, Kanney J L, Rechar R P, Stein J S, 2009. Deep borehole disposal of high-level radioactive waste. SAND2009-4401, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico.

Ekman L, 2001. Project Deep Drilling KLX02 – Phase 2. Methods, scope of activities and results. Summary report. SKB TR-01-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Geological Survey of Finland, 2007. Tillgänglig: http://en.gtk.fi/export/sites/default/Research/images/OKU_Fig4.jpg [Februari 2007].

Glamheden R, Hökmark H, 2010. Creep in jointed rock masses. State of knowledge. SKB R-06-94, Svensk Kärnbränslehantering AB.

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

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

Haring M, 2012. DEEP HEAT MINING: Development of a cogeneration power plant from an enhanced geothermal system in Basel, Switzerland. Tillgänglig: <http://www.geothermal.ch/fileadmin/docs/downloads/vortragps.pdf> [December 2012].

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

Hoag C I, 2006. Canister design for deep borehole disposal of nuclear waste. MS thesis. Dept. of Nuclear Engineering, Massachusetts Institute of Technology.

- Hoek E, Kaiser P K, Bawden W F, 1994.** Support of underground excavations in hard rock. Rotterdam: Balkema.
- Jackson D P, Dormuth K W, 2008.** Watching brief on reprocessing, partitioning and transmutation and alternative waste management technology – Annual report 2008. NWMO TR-2008-22, Nuclear Waste Management Organization, Canada.
- Juhlin C, 1991.** Scientific summary report of the deep gas drilling project in the Siljan Ring impact structure. Vattenfall U(G) 1991/4.
- Juhlin C, Sandstedt H, 1989.** Storage of nuclear waste in very deep boreholes: Feasibility study and assessment of economic potential. 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.
- Kirkbride M, Stringer N, 2002.** Ultra-deep shaft construction. *Tunnels & Tunnelling International* 34, 38–40.
- Ladanyi B, 1993.** Time-dependent response of rock around tunnels. I Hudson J A (red). *Comprehensive rock engineering*. Vol 2. Oxford: Pergamon, 77–112.
- LTH/Lunds Energi, 2003.** DGE#1, Final Well Report, April 2003. LTH/Lunds Energi.
- Malan D F, Drescher K, Vogler U W, 1998.** Shear creep of discontinuities in hard rock surrounding deep excavations. I Rossmann H P (red). *Mechanics of jointed and faulted rock: proceedings of the Third International Conference*, Vienna, 6–9 April 1998. Rotterdam: Balkema, 473–478.
- Maloney B, Zeni A, 2003.** Blind shaft drilling state of the art. Presented to World Rock Boring Association, Sudbury, Canada, 10 September 2003. Tillgänglig: http://www.shaftdrillers.com/uploads/media/SDI-WRBA_Article.pdf
- Martin C D, 1997.** Seventeenth Geotechnical Colloquium: The effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength. *Canadian Geotechnical Journal* 34, 698–725.
- Martin D, 2005.** Preliminary assessment of potential underground stability (wedge and spalling) at Forsmark, Simpevarp and Laxemar sites. SKB R-05-71, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- MIT, 2006.** The future of geothermal energy: impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st century. Massachusetts Institute of Technology.
- Nirex, 2004.** A review of the deep borehole disposal concept for radioactive waste. Nirex report N/108/, United Kingdom Nirex Ltd.
- NWTRB, 2013.** Deep borehole disposal of spent nuclear fuel and high-level waste. U.S. Nuclear Waste Technical Review Board. Tillgänglig: <http://www.nwtrb.gov/facts/deepborehole.pdf> [Augusti 2013].
- O'Brien M T, Cohen L H, Narasimhan T N, Simkin T L, Wollenberg H A, Brace W F, Green S, Pratt H P, 1979.** The very deep hole concept: evaluation of an alternative for nuclear waste disposal. Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California.
- Polsky Y, Capuano L, Finger J, Huh M, Knudsen S, Mansure A J C, Raymond D, Swanson R, 2008.** Enhanced Geothermal Systems (EGS) well construction technology evaluation report. SAND2008-7866, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico.
- Pusch R, Hökmark H, 1993.** Mechanisms and consequences of creep in the nearfield rock of a KBS-3 repository. SKB TR 93-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Rocscience, 2002.** RocLab: user's guide. Tillgänglig: <http://www.rocscience.com/assets/files/uploads/8076.pdf>. Toronto: Rocscience Inc.
- Rowe P, 1993.** Blind shaft drilling: the state of the art. Report DOE/NV/10630-T6, Reynolds Electrical and Engineering Co., Las Vegas, NV.
- Schwartz C W, Kolluru S, 1982.** The influence of stress level on the creep of unfilled rock joints. I Proceedings of the 23rd U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), Berkeley, California, 25–27 August 1982, 333–340.

Shaft drillers, 2007. Blind shaft drilling. State of the art. Tillgänglig: <http://www.shaftdrillers.com/> [Februari 2007].

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 platsundersökningsskedet [FUD-K]. (Även utgiven på engelska: Integrated account of method, site selection and programme prior to the site investigation phase. SKB TR-01-03). Svensk Kärnbränslehantering AB.

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

SKB 2005a. Preliminary site description. Forsmark area – version 1.2. SKB R-05-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB 2005b. Preliminary site description. Simpevarp area – version 1.2. SKB R-05-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.

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

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

Toth F L, 2011. Geological disposal of carbon dioxide and radioactive waste: a comparative assessment. Dordrecht: Springer. (Advances in Global Change Research 44)

Åhäll K-I, 2011. Deponeringsdjupets betydelse vid slutförvaring av högaktivt kärnavfall i berggrunden. Rapport till Kärnavfallsrådet.

Opublicerade dokument

SKBdoc id, version	Titel	Utfärdare, år
1176359 ver 1.0	Deep boreholes with large diameter in crystalline rock	IDEAS Ing.-Büro A. Sperber, 2007

Personliga kontakter (möte, telefon eller e-post) under perioden januari–mars år 2007:

Banks, D., Shaft Drillers International. E-post och telefon.

Dershowitz, B., Golder Associates US. E-post och telefon.

Doe, T., Golder Associates US. E-post.

Freyland, K., International Research Institute of Stavanger (IRIS). E-post, telefon, möte.

Gibb, F., University of Sheffield. E-post.

Halsey, G., SINTEF Petroleum Research. E-post, telefon, möte.

Häring, M.O., Geothermal Explorers Ltd. E-post.

Khakhaev, B.N., FGUP NPC NEDRA. Telefondiskussion och därefter sammanställde han ett kort PM med information.

Nesheim, A., Baker Inteq. Möte.

Newnham, L., RUC Mining Contractors Pty Ltd. E-post.

Paulsen, E., Hughes Christensen. Möte.

Rampley, M., Fugro Seacore Ltd. E-post.

Rommetveit, R., SINTEF Petroleum Research. E-post.

Sandre, E., Hughes Christensen. Möte.

Sperber, A., IDEAS. Möte.

Weimann, T., Herrenknecht Vertical GmbH. Möte.

Worrall, B., Geothermal Explorers Ltd. E-post och telefon.

Wundes, B., WWDC. Möte.

Personliga kontakter vid besök hos Herrenknecht Vertical år 2013:

Binder, J., Technical Director.

Maier, H., Managing Director.

Scharfenberg, S., Sales Engineer.